

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТЯГУР ВОЛОДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 681.7

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОГО І ЕНЕРГЕТИЧНОГО
РОЗДІЛЕННЯ КОСМІЧНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Спеціальність 05.11.07 – Оптичні прилади та системи

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

В.М. Тягур

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант: Колобродов Валентин Георгійович,
доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Тягур В.М. Підвищення просторового і енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.07 «Оптичні прилади та системи». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової проблеми підвищення просторового і енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем (ОЕС) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Основною тенденцією останніх років є створення нових легких космічних апаратів (КА) ДЗЗ високої просторової роздільної здатності (ВПРЗ). Для цього потрібно: створення нових високочутливих приймачів випромінювання з малими розмірами пікселів та великим динамічним діапазоном; розробка нових компактних довгофокусних об'єктивів, які забезпечують високу світлосилу та дифракційну якість зображення; удосконалення методів зйомки; проектування та виготовлення легких асферичних дзеркал.

Досі нема єдиного підходу при проектуванні для оптимального узгодження просторового й енергетичного розділення з масо-габаритними характеристиками систем ДЗЗ. Невирішеними залишаються і ряд проблем пов'язаних з збереженням просторового розділення в жорстких умовах експлуатації на орбіті цих систем та удосконаленням методів зйомки для підвищення просторового й енергетичного розділення. Вдосконалення методів калібрування ще один шлях підвищення просторового та енергетичного розділення.

Саме тому дослідження, які спрямовані на підвищення просторового та енергетичного розділення космічних систем ДЗЗ, вирішують актуальну проблему, яка має наукове та практичне значення.

У **першому розділі** обґрунтовано необхідність створення ОЕС з ВПРЗ на основі аналізу існуючих систем, їх характеристик та тенденцій їх розвитку. До складу сучасних супутників ДЗЗ можуть входити наступні системи: багатоспектральні та гіперспектральні сканери, космічні тепловізори (КТ). Найбільш важливими характеристиками таких систем є просторове, енергетичне і спектральне розділення, ширина смуги захвату, кількість спектральних каналів.

В розвитку сучасних КТ чітко простежуються такі основні тенденції: мініатюризація; багатоспектральність; підвищення просторового розділення; використання мікроболометричних матриць (МБМ). Проведений аналіз свідчить про те, що головною проблемою при створенні таких систем є підвищення якості зображення, що досягається застосування ОЕС з ВПРЗ, широким робочим спектральним діапазоном та високим спектральним розділенням.

Розглянуті основні характеристики систем спостереження високого та надвисокого просторового розділення, КТ та гіперспектральних систем дозволили сформулювати мету та задачі дослідження представленої дисертації.

У **другому розділі** розглянуто удосконалену модель ОЕС космічних сканерів ВПРЗ. Дослідження такої моделі дозволило визначити такі оптимальні параметри об'єктива, як фокусна відстань, кутове і лінійне поле зору, діаметр входної зіниці і роздільну здатність. Отримано формулу для знаходження необхідного діаметра апертури об'єктива в залежності від заданого просторового розділення, висоти орбіти супутника, робочого спектрального діапазону оптичної системи. В якості критерію для порівняння якості зображення різних об'єктивів запропоновано обрати відношення середнього значення лінійного розділення *ЛРМ* до величини *GSD*.

Отримано аналітичні формули модуляційних передавальних функцій (МПФ) окремих складових моделі, що обумовлені умовами експлуатації сканера, які враховують зміщення зображення об'єкту під час зйомки відносно пікселя за рахунок руху КА по орбіті, нестабільність положення осі КА та вібрації, зміщення зображення об'єкту під час зйомки в режимі TDI відносно стовпця пікселів за рахунок обертання Землі та зміни кута візування.

Розроблено метод визначення радіометричного або енергетичного розділення, під яким розуміють мінімальну різницю між коефіцієнтами відбиття об'єкта і фону, яка може бути виявлена ОЕС сканера з заданою ймовірністю. Для інтегральних параметрах сканера було отримано нову формулу для розрахунку радіометричного розділення в надирі. При відхиленні візирної осі сканера від надиру на кут збільшується проекція пікселя, що призводить до погіршення просторового розділення.

Третій розділ присвячено розробці і дослідженню оптичних систем об'єктивів сканерів ВПРЗ, які повинні мати значні фокусні відстані. Тому такі об'єктиви використовують дзеркальні системи, що можуть працювати в широкому спектральному діапазоні і мати невеликі габарити і вагу. Запропоновано абераційні моделі нових оптичних систем об'єктивів ВПРЗ, в результаті дослідження яких отримано нові формули залежності конструктивних параметрів об'єктива від відстаней між дзеркалами для виправлення в об'єктиві усіх п'ятих аберацій третього порядку.

На основі розробленої абераційної моделі запропоновано удосконалений об'єktiv Корша, який складається з головного ввігнутого дзеркала, другого опуклого дзеркала і ввігнутого третього дзеркала. Проведена оптимізація оптичної системи сканера, в результаті якої запропонована нова система з додатковим проекційним об'єктивом, що дозволяє використовувати один тип ПЗЗ-лінійок в панхроматичному й спектральному каналах.

Четвертий розділ присвячено удосконаленню і дослідженню моделі КТ з метою підвищення його просторової та енергетичної роздільної здатності. З цією метою була розглянута узагальнена модель системи «об'єкт –

атмосфера – об'єктив – мікроболометрична матриця (МБМ) – електронний блок обробки відеосигналів», дослідженням якої встановлено, що для досягнення ВПРЗ необхідно узгоджувати параметри об'єктива і МПМ за двома критеріями: рівності їх МПФ на частоті Найквіста і на заданій просторовій частоті.

Основними узагальненими характеристиками КТ є просторове і енергетичне (температурне) розділення, які об'єднуються функцією під назвою мінімальна роздільна різниця температур (MRPT). Була удосконалена і досліджена модель тепловізора, в якій вплив дисплея і спостерігача на величину MRPT вилучається. На основі цієї моделі було отримано нову формулу для MRPT КТ.

Забезпечення високої якості зображень при постійному полі зору потребує збільшення кількості елементів матричного приймача. Але це призводить до суттєвого ускладнення конструкції апаратури і підвищення її вартості. Для розв'язання даної проблеми було використано режим субпіксельної реєстрації зображень з метою відновлення зображення високого розділення. Запропоновано метод космічної зйомки для отримання субпіксельно зміщених зображень, який ефективно здійснюється шляхом повороту тепловізора відносно напрямку польоту КА. Отримано рівняння для MRPT при субпіксельній обробці зображень, аналіз якого показав значне підвищення роздільної здатності на високих просторових частотах.

В п'ятому розділі наведені результати дослідження переваг та недоліків оптичних систем гіперспектрометрів, які використовують призми та дифракційні ґратки, а також зображувальних Фур'є-спектрометрів (ЗСФ). В результаті досліджень сформульовані технічні вимоги до перспективного гіперспектрометра для майбутніх українських супутників ДЗЗ: робочий спектральний діапазон 0,4...2,5 мкм; спектральне розділення 6...30 нм; кількість спектральних каналів 150; просторове розділення на місцевості 45 м; ширина смуги огляду 46 км. Досліджено оптичні схеми

гіперспектрометрів з диспергуючими елементами у вигляді призми або дифракційної ґратки, гіперспектрометри зі змінним інтерференційним фільтром, Фур'є-спектрометри.

Шостий розділ присвячено розробці методів вимірювання та дослідження основних характеристик космічних ОЕС ДЗЗ. Розроблено нові методи геометричного і радіаційного калібрування ОЕС, які необхідно виконувати перед запуском космічного апарату.

Для реалізації методу геометричного калібрування був розроблений колімаційний вимірювальний комплекс, який полягає в «прив'язці» кутового положення крайніх пікселів лінійок до контрольного елементу. Для реалізації методу радіаційного калібрування запропоновано метод роздільного визначення відносної спектральної чутливості і абсолютизації її значення за допомогою інтегрального дифузійного випромінювача у вигляді інтегруючої сфери. Для спрощення процедури калібрування, зменшення габаритів та ціни установки в КП СПБ «Арсенал» було розроблено стенд, що базується на використанні абсолютного радіометру та дозволяє вимірювати світлотехнічні та енергетичні характеристики сканерів, вимірювання коефіцієнта розсіювання.

Запропоновано новий метод вимірювання коефіцієнту розсіювання об'єктів, в якому усунене обмеження на діаметр вхідної зіниці об'єктива по відношенню до внутрішнього діаметра фотометричної кулі, яке вимагається в стандартах. Це дозволяє зменшити внутрішній діаметр фотометричної кулі до 5 разів відносно діючих стандартів, а відносна похибка визначення коефіцієнта розсіювання знаходиться в межах $\pm 5\%$. При використанні діафрагми вперше з'являється можливість розділити коефіцієнт розсіювання об'єктива на складову, яка викликана розсіюванням світла на елементах конструкції об'єктива, і на складову, яка викликана розсіюванням світла при проходженні світлового потоку через оптичні елементи об'єктива.

Досліджено методи оптимізації конструкції полегшення дзеркал з урахуванням впливу сили тяжіння на деформацію дзеркал при контролі на

Землі дзеркальної поверхні. За допомогою розробленої програми Deform було проведено оптимізацію великогабаритного вісесиметричного дзеркала для сканера ВПРЗ. Найбільш оптимальним варіантом полегшення такого дзеркала є шестикутні отвори в задній стінці дзеркала з кріпленням дзеркала на три отвори в задній частині дзеркала. Коефіцієнт полегшення такого дзеркала сягає 75%, а деформація робочої поверхні в 10 разів менше, ніж у дзеркала без полегшення.

Для проведення експериментів було розроблено та виготовлено стенд для дослідження тепловізорів. Вимірювання МРРТ показали, що при застосуванні субпіксельної реєстрації зображень, спостерігається підвищення роздільної здатності на частоті Найквіста приблизно в 1,4 рази яке збільшується з збільшенням просторової частоти.

Проведені комп'ютерні дослідження за допомогою програми ZEMAX оптичних систем об'єктивів, які були розраховані за розробленими методами проектування об'єктивів для систем ДЗЗ з заданими властивостями, підтвердили ефективність цих методів.

Робота містить 100 рисунків, 22 таблиці, 267 літературних джерел та 8 додатків.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, методи проектування дзеркальних об'єктивів, сканери високого розділення, методи і апаратура контролю оптичних систем.

ANNOTATION

Tiagur V.M Increase spatial and radiometric resolution of space optical-electronic systems of remote sensing of Earth.

Thesis for the scientific degree of Doctor of technical sciences in specialty 05.11.07 "Optical devices and systems". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2020.

The dissertation discusses issues of increase spatial and radiometric resolution of space-based optoelectronic systems (OES) for Earth remote sensing (ERS).

Top trend of the last years is creation of the new easy spacecrafts (S) of ERS high spatial resolution (VPR). For this purpose it is necessary: creation of new highly sensitive receivers of radiation with small sizes of pixels and big dynamic range; development new compact long focal-length lens, which provide a high-speed lens and diffraction quality of the image; improvement of methods of shooting; design and production of lightweight aspherical mirrors.

Still there is no uniform approach at design for optimum coordination spatial and radiometric resolution with mass and dimensional characteristics of the ERS systems. Unresolved are also number of problems of dependent with preservation of spatial division in severe conditions of operation in an orbit of these systems and improvement of methods of shooting for increase spatial and power division. To improvement of methods of calibration one more way of increase spatial and power division.

For this reason researches which are directed to increase spatial and power division of the ERS space systems solve a current problem which has scientific and practical value.

The **first section** substantiates the need to create an OES with HSR based on an analysis of existing systems, their characteristics and trends in their development. Modern remote sensing satellites may include the following systems: multispectral and hyperspectral scanners, space thermal imagers (STI). The most important characteristics of such systems are spatial, energy and spectral resolution, the capture bandwidth, the number of spectral channels. The following main trends are clearly visible in the development of modern space thermal imagers: size reduction; multispectrality; increased spatial resolution; the use of microbolometric matrix (MBM). The analysis shows that the main problem in the creation of such systems is to improve the image quality achieved by the use of OES with HSR, a wide operating spectral range and high spectral resolution.

The main characteristics of the systems of observation of high and ultrahigh spatial resolution, STI and hyperspectral systems have allowed to formulate the purpose and tasks of research of the presented dissertation.

The **second section** discusses the advanced model of the OES space-based HSR scanners. The research of this model has made it possible to determine the optimum lens parameters such as focal length, angular and linear field of view, pupil diameter and resolution. The formula was obtained to find the required lens aperture diameter, depending on the given spatial resolution, satellite orbit height, operating spectral range of the optical system. As a criterion for comparing the image quality of different lenses, it is suggested to choose the ratio of the linear resolution LR to GSD .

Analytical modulation transfer functions (MTF) of individual components of the model are obtained, which depend on scanner operating conditions and take into account the displacement of the object image while shooting relative to the pixel due to the motion of the spacecraft in orbit, the instability of the spacecraft position axis and the vibration, shooting time in TDI mode relative to the pixel column by rotating the Earth and changing the viewing angle.

A method has been developed for determining radiometric or energy resolution, which is understood as the minimum difference between the reflection coefficients of the object and the background, which can be detected by the scanner's OES with a given probability. For the integrated parameters of the scanner, a new formula was obtained for calculating the radiometric resolution in nadir. When the line of sight of the scanner deviates from Nadir by an angle, the pixel projection increases, which leads to a deterioration in spatial resolution.

The **third section** is devoted to the development and research of optical systems of lenses of HSR scanners, which should have significant focal lengths. Therefore, such lenses use mirror systems that can operate in a wide spectral range and have small dimensions and weight. Aberrational models of new optical systems of HSR lenses are proposed. As a result of the research new formulas of the dependence of the lens design parameters on the distances between mirrors are obtained to correct all five third-order aberrations in the lens.

Based on the developed aberration model, an improved Korsh lens is proposed, which consists of a main concave mirror, a second convex mirror, and a

concave third mirror. The scanner optical system was optimized, as a result of which a new system with an additional projection lens was proposed, which makes it possible to use one type of CCD arrays in the panchromatic and spectral channels.

The **fourth section** is devoted to the improvement and research of the STI model in order to increase its spatial and energy resolution. For this purpose, a generalized model of the system “object – atmosphere – objective – microbolometric matrix (MBM) — electronic video processing unit” was considered. Research of the model established that in order to achieve STI, it is necessary to coordinate the parameters of the lens and the MBM according to two criteria: the equality of their MTF at the frequency Nyquist and at a given spatial frequency.

The main generalized characteristics of STI are spatial and energy (temperature) resolution, which are combined by a function called the minimum temperature difference (MTD). The model of the thermal imager was improved and researched, in which the influence of the display and the observer on the MTD value is removed. Based on this model, a new formula for STI MTD was obtained.

Ensuring high quality images with a constant field of view requires an increase in the number of elements of the matrix detector. But this leads to a significant complication of the design of the equipment and an increase in its cost. To solve this problem, the Sub-pixel image registration mode was used to restore high-resolution images. A space survey method is proposed for obtaining Subpixel-shifted images, which is effectively carried out by rotating the thermal imager relative to the direction of spacecraft flight. Equations for MTD with Subpixel image processing are obtained, the analysis of which showed significant increase in resolution at high spatial frequencies.

The **fifth section** presents the results of research of the advantages and disadvantages of optical systems of hyperspectrometers that use prisms and diffraction gratings, as well as imaging Fourier spectrometers (ISF). As a result of the research, the technical requirements for a promising hyperspectrometer for future Ukrainian remote sensing satellites were formulated: a working spectral

range of 0.4 ... 2.5 microns; spectral resolution of 6 ... 30 nm; the number of spectral channels 150; spatial resolution in the area of 45 m; viewing width 46 km. Optical schemes of hyperspectrometers with dispersing elements in the form of a prism or diffraction grating, hyperspectrometers with a variable interference filter, and Fourier spectrometers are researched.

The **sixth section** is devoted to the development of methods for measuring and researching the basic characteristics of the space OES ERS. New methods have been developed for the geometric and radiation calibration of the OES, which must be performed before launching the spacecraft.

To implement the method of geometric calibration, a collimation measuring complex was developed, which consists in “linking” the angular position of the extreme points of the rulers to the control element. To implement the radiation calibration method, a method is proposed for separately determining the relative spectral sensitivity and its absolute value using an integral diffuse emitter in the form of an integrating sphere. To simplify the calibration procedure, reduce the size and installation cost in the ARSENAL Special Device Production State Enterprise, a stand was developed based on the use of an absolute radiometer. It allows you to measure the lighting and energy characteristics of scanners, and measure the scattering coefficient.

A new method is proposed for measuring the scattering coefficient of lenses, which eliminates the restriction on the diameter of the entrance pupil of the lens in relation to the inner diameter of the photometric ball, which is required by the standards. This makes it possible to reduce the inner diameter of the photometric ball by up to 5 times with respect to current standards, and the relative error in determining the scattering coefficient within $\pm 5\%$. When using the diaphragm for the first time, it becomes possible to divide the lens scattering coefficient into a component that is caused by light scattering on the lens structural elements, and into a component that is caused by light scattering when the light flux passes through the optical elements of the lens.

Methods of optimizing the design of lightening mirrors taking into account the influence of gravity on the deformation of mirrors when monitoring a mirror surface on Earth are researched. Using the developed program Deform, optimization of a large axisymmetric mirror for the HSR scanner was carried out. The best option for facilitating such a mirror is the hexagonal holes in the rear wall of the mirror with the mirror mounted on three holes in the rear of the mirror. The lightness coefficient of such a mirror reaches 75%, and the deformation of the working surface is 10 times less than in mirrors without relief.

For experiments, a stand for the research of thermal imagers was developed and manufactured. Measurements of MTD showed that when applying Subpixel image registration, an increase in resolution at the Nyquist frequency is observed by about 1.4 times, which increases with increasing spatial frequency.

Computer researches were carried out using the ZEMAX program of optical lens systems, which were calculated using the lens design methods developed for ERS systems with desired properties, and confirmed the effectiveness of these methods.

The work includes 100 figures, 22 tables, 267 references and 8 appendices.

Keywords: *Earth remote sensing, mirror lens design methods, high resolution scanners, optical systems control methods and equipment.*

Список публікацій здобувача

1. Тягур В.М. Підвищення просторової роздільної здатності космічних мікроболометричних камер : монографія / В.М. Тягур, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко. – Київ: «Вік прінт», 2018. – 223 с.

Здобувачем зроблено аналіз мікроболометричних передавальних камер для дистанційного зондування Землі із космосу.

2. Тягур В.М. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / В.М. Тягур, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев // Наукові вісті НТТУ

“КПІ”. – 2012. – №5. – С.114–117. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

Здобувачем запропоновано і досліджено метод ахроматизації оптичних систем об’єктивів для тепловізорів.

3. Тягур В.М. Новий метод визначення коефіцієнта розсіювання об’єктивів / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Український метрологічний журнал. – 2013. – Вип. 3. – С. 27–32. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, [Emerging Sources Citation Index](#) (ESCI), [Bielefeld Academic Search Engine](#) (BASE) та інших).

Здобувачем запропоновано новий метод для вимірювання коефіцієнтів розсіювання.

4. Тягур В.М. Мінімальна роздільна різниця температур тепловізора космічного базування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20. – №1. – С. 23–27. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).

Здобувачем запропонована і досліджена модель космічного тепловізора, яка не враховує дисплей і оператора.

5. Тягур В.М. Установка для вимірювання коефіцієнта розсіювання об’єктивів у відповідності з новим методом його визначення / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Український метрологічний журнал. – 2014. – Вип. 1. – С. 26–34. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, [Emerging Sources Citation Index](#) (ESCI), [Bielefeld Academic Search Engine](#) (BASE) та інших).

Здобувачем розроблено структурну схему установки для вимірювання коефіцієнта розсіювання об’єктивів.

6. Тягур В.М. Математическое моделирование тепловизионного прибора наблюдения с микроболометрической матрицей / В.М. Тягур, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // «Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування» – 2014. – №48 (2). – С. 28–38. (Видання індексується в

наукометричних базах Index Copernicus, PИИЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Здобувачем досліджена модуляційна передавальна функція тепловізора з мікроболометричною матрицею.

7. Тягур В.М. Оптичні системи зображуючих Фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Космічна наука і техніка. – 2014. – Т. 20. – №5. – С. 35–40. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).

Здобувачем запропонована класифікація зображуючих Фур'є-спектрометрів.

8. Тягур В.М. Трехзеркальный анастигматический квазиортоскопический объектив с внеосевым полем зрения / В. М. Тягур, Н. И. Лихолит // Космічна наука і техніка. – 2015. – Т. 21. – №2. – С. 27–33. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).

Здобувачем запропонована нова оптична система тридзеркального анастигматичного об'єктива з позаосьовим полем зору.

9. Тягур В.М. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельної обробки зображень /В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.О. Попов, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // Наука та інновації, 2015. – Т.11. – № 6. – С.16–28. (Видання індексується в наукометричних базах Ulrich's Periodicals Directory та Index Copernicus).

Здобувачем досліджено метод підвищення роздільної здатності спектрорадіометра при реєстрації субпіксельно зміщених зображень.

10. Тягур В.М. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков //

Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2017. – №2. – С.89–96. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

Здобувачем запропоновано математичну модель для розрахунку деформації поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал.

11. Tiagur V.M. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System's Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles / V.M. Tiagur, V.H. Kolobrodov, M.I. Lykholit, V.I. Mykytenko, C.V. Dobrovolska // Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotechnika Radioaparotobuduvannia. – 2017. – Iss. 69. – P. 30–34.. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ та інших).

Здобувачем розроблена геометрична модель для дослідження енергетичного розділення оптико-електронної системи космічного сканера.

12. Тягур В.М. Оптико-електронні системи дистанційного зондування Землі надвисокої роздільної здатності / В.М. Тягур // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2017. – Вип. 53(1) – С.16–24. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PИHЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

13. Tiagur V. Development of software for combining finite element and optical analyses / V. Tiagur, V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – №4/9 (88). – С.46–53. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Scopus та інших).

Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку оптичних дзеркал при наявності деформацій.

14. Тягур В.М. Тридзеркальний анастигматичний осесиметричний об'єктив з виправленою дисторсією / В.М. Тягур // Космічна наука і техніка. – 2017. – Т. 23. – №5. – С. 55–61.

15. Тягур В.М. Просторове розділення системи дистанційного зондування при зміні кута візування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю.

Пінчук // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2018. – №1. – С. 54–64. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

Здобувачем досліджено процес зміни форми проекції пікселя сканера на поверхні Землі при зміні кута візування.

16. Тягур В.М. Вплив кутів візування та кривизни поверхні Землі на просторове розділення космічної оптико-електронної системи спостереження / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2018. – №5. – С.63–75. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

Здобувачем отримана формула для дослідження просторового розділення сканера, яка враховує кривизну поверхні Землі.

17. Тягур В.М. Модуляційна передавальна функція системи дистанційного зондування при відхиленні осі візування від надира / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2018. – №6. – С.51–65. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

Здобувачем досліджена МПФ ОЕС при відхиленні осі візування від надира.

18. Тягур В.М. Метод калибровки угловых параметров сканеров дистанционного зондирования Земли / В.М.Тягур, Т.Н. Генсичкая, Т.И. Гураль // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2019. – №1. – С.44–51. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

Здобувачем запропоновано метод геометричної калібровки кутових параметрів сканера ДЗЗ.

19. Тягур В.М. Обоснование технического облика бортового оптико-электронного комплекса среднего пространственного разрешения перспективного спутника дистанционного зондирования Земли / Тягур В.М.,

Попов М.А., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Лихолит Н.И., Полежаев В.В. // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сборник научных статей, Т.7, №2, М., ООО ДоМира, 2010. С. 293-299.

Здобувачем запропоновано і розглянуто оптимальний склад бортового оптико-електронного комплексу перспективного супутника ДЗЗ.

20. TYAGUR Vladimir M. Satellite imagery resolution enhancement using subpixel frames acquisition / Sergey A. STANKEVICH, Sergey V. SHKLYAR, Vladimir M. TYAGUR // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2013. – Vol 11. – No. 2 – P.135–145. (Закордонне видання індексується в наукометричних базах EBSCOhost, Compendex, Scopus, Inspec, ProQuest, Science Citation Index Expanded, and the Web of Science).

Здобувачем запропоновано метод розрахунку роздільної здатності при реєстрації субпіксельно зміщених зображень.

21. Тягур В.М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового апохромата / В.М. Тягур, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81. – №4. – С.42–47. (Закордонне видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Scopus та інших).

Здобувачем розроблена система рівнянь для розрахунку параметрів ІЧ об'єктива з мінімальними термічними і хроматичними абераціями.

22. Tyagur V.M. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution / Tyagur V.M., Lyalko, Popov V.A., Stankevich S.A., Shklayr S.V., Podorva N.V., Likholt N.I., C.V. Dobrovolska C.V. // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2014. – Vol. 12. – No. 2 – P.153–164. (Закордонне видання індексується в наукометричних базах EBSCOhost, Compendex, Scopus, Inspec, ProQuest, Science Citation Index Expanded, and the Web of Science).

Здобувачем запропонована оптична система космічного спектрорадіометра високого просторового розділення.

23. Патент України на винахід №94157 Україна, МКВ G02B 23/02. Спосіб створення електронного зображення Землі у космічному сканері і пристрій для його реалізації / Тягур В.М., Гринюк І.Є., Лихоліт М.І., Пасько І.М., (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №94157; заявл. 25.09.2009 а200909785; опубл. 11.04.2011, Бюл. №7.

Здобувачем досліджено спосіб формування зображення за допомогою оптико-електронного сканера космічного базування.

24. Патент України на винахід №94303 МКВ G02B 17/00 Три дзеркальний анастигматичний квазіортоскопічний об'єктив / Тягур В.М., Лихоліт М.І., Гринюк І.Є. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №94303; заявл. 08.07.2009 а200907107; опубл. 26.04.2011, Бюл. №8.

Здобувачем запропоновано оптичну систему три дзеркального анастигматичного об'єктива для сканера високого розділення.

25. Патент України на винахід №96354 МКВ G06K 9/64 Пристрій для підвищення просторової розрізненості багатоспектральних аерокосмічних зображень на основі класифікування спектральних сигнатур об'єктів / Тягур В.М., Попов М.О., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Ліхоліт М.І., Полежаєв В.В. (Україна); заявник НЦАКДЗ ІГН. - №96354; заявл. 01.03.2010 а201002315; опубл. 25.10.2011, Бюл. №20.

Здобувачем досліджено метод підвищення просторового розділення багато спектрального космічного сканера.

26. Патент України на винахід №99217 МКВ G01J 3/12. Призмовий спектрометр / Тягур В.М., Кислий В.П., Леваш Л.В., Ліптуга А.І., Прохорович А.В. (Україна); заявник Інститут фізики напівпровідників. - №99217; заявл. 24.05.2011 а201106550; опубл. 25.07.2012, Бюл. №14.

Здобувачем запропоновано ввести до спектрометра додаткове дзеркало.

27. Патент України на винахід №103242 МКВ G01M 11/02, G02B 13/00. Пристрій для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів та виробів на їх

основі і спосіб його використання / Тягур В.М., Камінський С.Ф., Лихоліт М.І. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №10342; заявл. 08.12.2011 а201114581; опубл. 25.09.2013, Бюл. №18.

Здобувачем розроблено алгоритм вимірювання коефіцієнта розсіювання.

28. Патент України на винахід №108282 МКВ G02B 9/14; G02B 13/14 . Трилінзовий атермальний світлосильний об'єктив для інфрачервоного діапазону спектра / Тягур В.М., Лихоліт М.І., Варьонова Г.Л. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №108282; заявл. 04.07.2013 а201308394; опубл. 10.04.2015, Бюл. №7.

Здобувачем досліджено термічні аберації ІЧ об'єктива.

29. Патент України на винахід №109181 МКВ G01C 3/08 Спосіб підвищення просторової розрізненності при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення/ Тягур В.М., Лихоліт М.І., Лялько В.І., Попов М.О., Станкевич С.А., Харитоненко К.В. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №109181; заявл. 17.09.2013 а201311086; опубл. 27.07.2015, Бюл. №14.

Здобувачем запропоновано метод формування субпіксельно зміщених зображень.

30. Патент України на винахід №113104 МКВ G02B 17/00; G02B 17/06. Тридзеркальний анастигматичний бездисторсійний об'єктив / Тягур В.М., Лихоліт М.І. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №113104; заявл. 22.04.2015 а201503823; опубл. 12.12.2016, Бюл. №23.

Здобувачем оптимізовано конструктивні параметри тридзеркального анастигматичного об'єктива.

31. Патент України на винахід №117909 МКВ G01C 3/08 Інфрачервоний матричний знімальний спектро радіометр субпіксельної розрізненності / Тягур В.М., Попов М.О., Станкевич С.А., Лялько В.І., Лихоліт М.І., Добровольська К.В. (Україна); заявник НЦАКДЗ ІГН. - №117909; заявл. 04.11.2014 а201411946; опубл. 25.10.2018, Бюл. №20.

Здобувачем запропоновано перераховувати зображення різних спектральних каналів на єдину фізичну величину.

32. Тягур В.М. Досягнення і проблеми розвитку аерокосмічних оптико-електронних сенсорів ДЗЗ / В.М. Тягур, М.О. Попов, М.І. Лихоліт, В.В. Полежаєв С.А. Станкевич С.А. // Матеріали доповідей Першої Всеукраїнської конференції з запрошенням закордонних учасників. – Київ. – 2008. – С. 23–25.

Здобувачем проаналізовані досягнення і проблеми розвитку ОЕС ДЗЗ.

33. Тягур В.М. Возможности спутниковых гиперспектрометров при решении тематических задач природопользования, экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций / М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.П. Ковальчук, Н.И. Лихолит, В.В. Полежаев // Збірник наукових праць 8 Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях”. – Крым. – 2009. – С. 50–65.

Здобувачем обґрунтовані можливість використання космічних гіперспектрометрів в різних сферах народного господарства.

34. Тягур В.М. Программа расчета дифракционных компенсаторов для контроля асферических поверхностей / В.М. Тягур, А.П. Чумак // Збірник тез доповідей IX науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2010. – С.67–68.

Здобувачем розроблено програму для розрахунку оптичних елементів.

35. Тягур В.М. Программа для расчета энергетических и пространственных характеристик сканера дистанционного зондирования Земли поверхностей / В.М. Тягур, А.П. Чумак, О.Ю. Сахарнова // Збірник тез доповідей IX науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2010. – С.68–69.

Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку просторового розділення сканера системи ДЗЗ.

36. Тягур В.М. Оптическая система гиперспектрометра для дистанционного зондирования Земли / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей X науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2011: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2011. – С.51–52.

37. Тягур В.М. Оптические системы инфракрасных объективов для охранных систем наблюдения / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, А.Л. Варенова, И.В. Вовк, В.М. Кузнецов // Збірник тез доповідей X науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2011: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2011. – С. 52–53.

Здобувачем розроблені дві оптичні системи ІЧ об'єктивів тепловізорів.

38. Tiagur V.M. Design of compact multiband satellite imager using complex mathematical model / A.L. Makarov, L.V. Varichenko, N.I. Lykholit, I.E. Hrynyuk, V.M. Tiagur, V.F. Tkachenko, R.V. Kurdydyk // Proc. SPIE 8011, 80111T. Abstracts book of 22nd General Congress of the International Commission for Optics (ICO-22). – Puebla: Mexico. – 2011. – P.151–152.

Здобувачем досліджена фізико-математична модель багатоспектральної супутникової системи спостереження.

39. Тягур В.М. Оптические системы многоспектрального сканера и сканера среднего ИК-диапазона для дистанционного зондирования Земли / Тягур В.М., Рыбак В.В. // Международная научная конференция «Независимый Казахстан: 20 лет развития космических исследований». – Алматы: Казахстан. – 2011. – С. 27.

Здобувачем запропоновано оптичні системи спектрального сканера ДЗЗ.

40. Тягур В.М. Метод калибровки угловых параметров ОЭП / В.М.Тягур, Т.И. Гураль, Т.Н. Генсницкая, Н.И., П.В. Соболев // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 52–53.

Здобувачем розроблено метод і апаратуру для кутової калібровки ОЕП.

41. Тягур В.М. Субпіксельна обробка інфрачервоних космічних зображень з метою підвищення їх роздільної здатності / В.М.Тягур, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, К.В. Харитоненко // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 53–54.

Здобувачем запропоновано алгоритм обробки субпіксельних зображень.

42. Тягур В.М. Новий метод визначення коефіцієнту розсіювання об’єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт М.І. // Збірник тез доповідей XI наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 55–56.

Здобувачем розроблено модель визначення розсіювання об’єктива.

43. Тягур В.М. Установка для визначення, у відповідності з новим методом, коефіцієнту розсіювання об’єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Збірник тез доповідей XI наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 56–57.

Здобувачем запропонована схема для вимірювання розсіювання.

44. Тягур В.М. Удосконалення установки для визначення по новому методу коефіцієнту розсіювання об’єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 58–59.

Здобувачем удосконалена схема для вимірювання розсіювання в об’єктиві.

45. Тягур В.М. Мікроболометрична матрична камера дальнього інфрачервоного діапазону для космічної зйомки / В.М. Тягур, М.О. Попов,

М.І. Лихоліт, С.А. Станкевич, О.В. Тітаренко // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 68–69.

Здобувачем запропонована модель космічного тепловізора на МБМ.

46. Тягур В.М. Атермальный объектив для ИК-сканера ДЗЗ, работающий в диапазоне температур -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$ / В.М. Тягур, Н.И. Лихолит, А.Л. Варенова, В.И. Парубец // Збірник тез доповідей XII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2013. – С. 61–62.

Здобувачем розроблена система рівнянь для проектування ІЧ об'єктива.

47. Тягур В.М. Апаратура для контроля тепловизионных приборов / В.М. Тягур, Т.И. Гураль, Т.Н. Генсницкая, Н.И. Овчар, В.П. Соболев // Збірник тез доповідей XII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2013. – С. 62–63.

Здобувачем розроблена структура стенду для вимірювання МРРТ.

48. Tyagur V. Subpixel Resolution Satellite Imaging Technique / V. Tyagur, S. Stankevich, S. Shklyar // Digital Technologies, Proceedings of the Ninth International Conference. – ZILINA, SLOVAKIA. – 2013. – P. 81–84.

Здобувачем досліджено метод субпіксельної обробки ІЧ зображень.

49. Тягур В.М. ИК-камера космического базирования с микроболометрической матрицей / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «ABIA-2013». – Київ. – С. 27.41–27.44.

Здобувачем обґрунтована можливість використання МБМ в ОЕС ДЗЗ.

50. Тягур В.М. Методы компьютерного повышения разрешения инфракрасных изображений для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко, В.Г.

Колобродов // Матеріали XI наук.-техн. конференції «ABIA-2013». – Київ. – С. 27.52–27.56.

Здобувачем запропоновано нові критерії оцінки ефективності ІЧ ОЕС.

51. Тягур В.М. Основные характеристики ИК камер для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И.. Лихолит, В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Е.В. Добровольская // Тези доповідей XIII наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”.– К:, НТТУ “КПІ”.–2014.–С. 47.

Здобувачем запропоновано основні характеристики ІЧ камер ДЗЗ.

52. Тягур В.М., Оптичні системи зображуючих Фур'є – спектрометрів дистанційного зондування Землі / Н.И.. Лихолит, В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков//Збірник тез доповідей XIII конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2014. – С. 64–65.

Здобувачем проведено розрахунок оптичної системи спектрометра.

53. Tyagur V. Subpixel processing of images from the frame infrared camera for future Ukrainian remote sensing satellite system / V. Tyagur, S. Stankevich, M. Popov, V. Lyalko, S. Shklyar, C. Dobrovolska, N. Likholyt // Digital Technologies, Proceedings of the 10th International Conference. – 2014. – ZILINA, SLOVAKIA. – P. 232–235.

Здобувачем обґрунтована доцільність використання субпіксельних кадрів.

54. Tyagur V. Functional model of the new multiband infrared radiometer for “Sich” Earth observation satellite system / V. Tyagur, S. Stankevich, M. Popov, S. Shklyar, C. Dobrovolska // Тези доповідей на 14-й Українській конференції з космічних досліджень. – Ужгород. – 2014. – С.72.

Здобувачем досліджена модель нового ІЧ спектрометрорадіометра.

55. Тягур В.М. Математична модель тепловізійної камери космічного базування з субпіксельною реєстрацією зображень / В. М. Тягур, К.В.

Добровольська, М. І. Лихоліт, Колобродов В.Г. // Тези доповідей на 14-й Українській конференції з космічних досліджень. – Ужгород. – 2014. – С. 74.

Здобувачем досліджена математична модель тепловізора з субпіксельною обробкою зображень.

56. Тягур В.М. Объективы систем ДЗЗ КП СПС «Арсенал» / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української наукової конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С. 28–32.

57. Тягур В.М. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра із субпіксельним підвищенням просторової розрізненості / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.І. Лихоліт, К.В. Добровольська та інші // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С. 33–35.

Здобувачем запропоновано метод підвищення розділення ІЧ камери.

58. Тягур В. М. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень ІЧ камери ДЗЗ та експериментальні дослідження підвищення просторової роздільної здатності / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.І. Лихоліт, К.В. Добровольська та інші // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.47–50.

Здобувачем досліджено просторове розділення ІЧ камери ДЗЗ.

59. Тягур В.М. Математична модель функціонування статичного зображуючого фур'є-спектрометра дистанційного зондування Землі / Д.В. Поздняков, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Збірник тез конфер. «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.53–55.

Здобувачем досліджена модель зображуючого фур'є-спектрометра.

60. Тягур В.М. Исследование характеристик аппаратуры контроля тепловизионных систем с использованием аппаратуры контроля “IRVISION” / В.М. Тягур, Т.И. Гураль, Н.И. Овчар, Р.Б. Рысов, В.П. Соболев // Збірник тез

доповідей Української наукової конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.122–125.

Здобувачем розроблено методики проведення контролю тепловізорів.

61. Тягур В.М. Метод та обладнання для визначення коефіцієнта розсіювання знімальних об'єктів та об'єктів для спостереження / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт / Збірник тез доповідей конфер. «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.126–130.

Здобувачем запропоновано метод вимірювання коефіцієнта розсіювання.

62. Тягур В.М. Исследование влияния параметров микроболометрических матриц на характеристики ИК камер космического базирования / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихоліт // Збірник тез доповідей XIV наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2015. – С. 69–70.

Здобувачем запропоновано метод узгодження параметрів об'єктива і МБМ.

63. Тягур В.М. Математичне моделювання зображувального Фур'є-спектрометра статичного типу для дистанційного зондування Землі / В. М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XIV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2015. – С.71.

Здобувачем досліджена модель зображувального спектрометра для ДЗЗ.

64. Tiagur V.M. Accuracy Improvement Of The Land Surface Physical Paramemers Estimation By Infrared Satellite Imaging / V. M. Tiagur, S.A. Stankevich, C. V. Dobrovolska, N.S. Lubsky N.S. // Збірник тез доповідей 15 Української конференції з космічних досліджень. – Одеса. – 2015. – С. 212.

Здобувачем запропоновано метод вимірювання випромінювання Землі.

65. Тягур В.М. Контроль форми ввігнутих асферичних дзеркал / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2016. – С. 35–36.

Здобувачем запропоновано метод контролю контролю форми дзеркал.

66. Тягур В.М. Моделювання полегшення дзеркал оптичної системи космічного базування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2016. – С. 36–37.

Здобувачем досліджена модель полегшення дзеркал космічного базування.

67. Тягур В.М. Модуляционная передаточная функция микроболометрической матрицы при использовании субпиксельной регистрации изображений / В.М. Тягур, Е.В. Добровольська, В.Г. Колобродов // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 195.

Здобувачем отримано МПФ МБМ з субпиксельною реєстрацією зображень.

68. Тягур В.М. Анализ влияния деформаций оптических поверхностей на качество изображения в сканерах ДЗЗ/В.М. Тягур, К.А. Нгуен, В.М. Сокурено // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 209.

Здобувачем проведено аналіз впливу деформацій дзеркала на його ФРТ.

69. Тягур В.М. Аналіз впливу полегшення дзеркал для сканерів ДЗЗ на деформацію їх оптичної поверхні / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 218.

Здобувачем розроблена модель деформації поверхні дзеркала.

70. Тягур В.М. Целостная технология получения изображений повышенного пространственного разрешения от перспективного спутникового инфракрасного спектрорадиометра / В.М. Тягур, Н.И. Лихолит, В.И. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич, К.В. Добровольская // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 225.

Здобувачем запропоновано метод підвищення розділення спектрорадіометра.

71. Тягур В.М. Оптико-электронные системы ДЗЗ сверхвысокой разрешающей способности / В.М. Тягур // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса – 2016. – С. 228.

72. Tiagur V.M. Three-mirror anastigmatic quasi-ortoscopic lens / V.M. Tiagur // Proceeding of 2016 China-Ukraine forum on Science and Technology. – 2016. – P. 132.

73. Тягур В.М. Оценивание параметров тепловизионных систем наблюдения на аппаратуре контроля «IR VISION» / Гураль Т.И., Тягур В.М., Лихолит Н.И., Овчар Н.И., Кирилюк Н.Е // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 63–65.

Здобувачем розроблено метод вимірювання характеристик тепловізора.

74. Тягур В.М. Минимальна сприймаюча різниця температур тепловізора / В.М. Тягур, М.М. Луцюк, В.Г. Колобродов // Збірник тез доповідей 2-ої Української наукової конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 65–68.

Здобувачем обґрунтована доцільність використання мінімальної сприймаючої різниці температур.

75. Тягур В.М. Использование модели функции рассеяния точки объектива для повышения разрешения изображений ИК камер при

дистанционном зондировании Земли / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, П.А. Кондратов, А.Г. Оганесян, В.Ф. Ткаченко // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 182–185.

Здобувачем отримано аналітичний вираз функції розсіювання точки.

76. Тягур В.М. Метод контролю форми асферичних дзеркал / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XVI наук.-техн. конф. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – К.: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2017. – С. 32–33.

Здобувачем запропоновано метод контролю асферичних дзеркал.

77. Тягур В.М. Облегчение крупногабаритных зеркал и методы их крепления / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Сборник тезисов докладов 6-й Международной конференции «Космические технологии: Настоящее и будущее». – Днепр. – 2017. – С. 80.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання кріплення дзеркал.

78. Tiagur Volodymyr M. Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles / Volodymyr M. Tiagur Valentin G. Kolobrodov; Catherine V. Dobrovolska; Volodymyr I. Mykytenko; Grygorij S. Tymchik // Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. – 2017. – 104450J.

Здобувачем отримана формула для дослідження просторового розділення сканера при зміні кута візування.

79. Тягур В.М. Тенденції розвитку систем ДЗЗ / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 3-ої наук.-техн. конф. «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С. 18–19.

80. Тягур В.М. Сканер сверхвысокой разрешающей способности / В.М. Тягур, А.С. Притула // Збірник тез доповідей 3-ої Української науково-

технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С.112–113.

Здобувачем запропоновано схему довгофокусного дзеркального об'єктива.

81. Тягур В.М. Повышение разрешения изображений ИК камер при дистанционном зондировании Земли / В.М. Тягур, П.А. Кондратов, Е.В. Добровольская, П.А. А.Г. Оганесян, В.Ф. Ткаченко // Збірник тез доповідей 3-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С. 131–134.

Здобувачем досліджено метод підвищення просторового розділення ІЧ камер, який ґрунтується на узгодженні параметрів об'єктива і МБМ.

82. Тягур В.М. Оцінка ефективності тепловізійних та телевізійних космічних систем спостереження / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Збірник тез доповідей наук.-техн. конф. «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С. 134–137.

Здобувачем запропоновано для оцінки ефективності використовувати просторове і енергетичне розділення.

83. Тягур В.М. Оптимізація габаритно-вагових параметрів систем ДЗЗ надвисокої просторової роздільної здатності / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XVII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – К.: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2018. – С. 37–38.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	35
Вступ	36
Розділ 1 Аналіз основних напрямків розвитку оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі	47
1.1 Призначення та основні характеристики оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі	47
1.2 Оптико-електронні системи спостереження високого та надвисокого просторового розділення	49
1.3 Інфрачервоні оптико-електронні системи спостереження космічного базування	57
1.4 Гіперспектральні системи дистанційного зондування Землі	68
1.5 Мета і задачі дослідження дисертаційної роботи на основі проведеного аналізу	78
Висновки до розділу 1	82
Розділ 2 Фізико-математична модель оптико-електронних систем космічних сканерів високого і надвисокого просторового розділення	84
2.1 Формування зображення в сканерах космічного базування	84
2.2 Оптимізація параметрів сканера	87
2.3 Модель формування зображення в сканері при відхиленні візирної осі від надиру	91
2.4 Методи підвищення якості зображення в сканерах високого і надвисокого просторового розділення	102
2.4.1 Вплив нестабільності положення осі космічного апарата на МПФ сканера	104
2.4.2 Вплив вібрацій космічного апарата на МПФ сканера	105
2.4.3 Вплив нестабільності висоти польоту космічного апарата на	106

МПФ сканера	
2.4.4 МПФ сканера за рахунок обертання земної кулі	107
2.4.5 МПФ сканера при відхиленні візирної осі від надиру	111
2.4.6 МПФ сканера при зйомці з змінними кутами візування	113
2.4.7 Вимоги до космічного апарату та ОЕС сканера високої та надвисокої просторової роздільної здатності	114
2.5 Радіометричне розділення при відхиленні візирної осі сканера від надиру	118
Висновки до розділу 2	122
Розділ 3 Оптичні системи сканерів ДЗЗ високого та надвисокого просторового розділення	125
3.1 Метод проектування тридзеркального квазіортоскопічного об'єктиву з позаосьовим полем зору	125
3.2 Метод проектування тридзеркального вісесиметричного об'єктиву з виправленою дисторсією	135
3.3 Оптимізація оптичної системи сканера з проекційним об'єктивом	147
Висновок до розділу 3	150
Розділ 4 Фізико-математична модель інфрачервоної системи спостереження космічного базування	151
4.1 Формування зображення в тепловізійній системі космічного базування	151
4.1.1 Узгодження параметрів об'єктиву і мікроболометричної матриці	160
4.1.2 Мінімальна роздільна різниця температур тепловізійної камери космічного базування	166
4.1.3 МПФ «змазу» при роботі космічного тепловізора з мікроболометричною матрицею	170

4.2	Підвищення просторової роздільної здатності тепловізійної камери шляхом реєстрації та обробки зображень з субпіксельним зміщенням	173
4.3	Метод проектування атермального об'єктива для космічного тепловізора	181
4.4	Удосконалення методу дистанційного вимірювання температури земної поверхні інфрачервоним спектро радіометром космічного базування	191
	Висновки до розділу 4	199
	Розділ 5 Оптичні системи гіперспектрометрів	201
5.1	Принципи побудови і особливості використання гіперспектрометрів	201
5.2	Оптичні схеми гіперспектрометрів	209
5.2.1	Оптична схема гіперспектрометра на дифракційних ґратці	213
5.2.2	Оптична схема гіперспектрометра на призмі	218
5.2.3	Зображувальні Фур'є спектрометри	221
	Висновки до розділу 5	228
	Розділ 6 Розробка методів вимірювання та дослідження основних характеристик космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі	230
6.1	Геометричне калібрування систем дистанційного зондування	230
6.2	Радіометричне калібрування систем дистанційного зондування	238
6.3	Вимірювання коефіцієнту розсіювання об'єктів	255
6.4	Оптимізація конструкції полегшення дзеркал з урахуванням впливу сили тяжіння на деформацію дзеркал	279
6.5	Експериментальні дослідження тепловізійної камери космічного базування з мікроболометричною матрицею	284
6.5.1	Стенд для дослідження тепловізійної камери	284
6.5.2	Дослідження MPRT тепловізора при обробці двох	287

зображень з субпіксельним зміщенням	
6.5.3 Дослідження методу дистанційного вимірювання температури ІЧ камерою	290
6.6 Розрахунок об'єктивів за розробленим методом	295
Висновки до розділу 6	300
Висновки	303
Перелік посилань	306
Додатки А	339
Додатки Б	342
Додатки В	346
Додаток Г	353
Додаток Д	359
Додаток Е	364
Додаток Ж – Акти впровадження	370
Додаток З - Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дослідження	374

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВО	Візорні осі
ВПРЗ	Висока просторова роздільна здатність
ДЗЗ	Дистанційне зондування Землі
ДФС	Динамічний Фур'є-спектрометри
ЗЗВ	зразкові засоби вимірювання
ЗФС	Зображувальний Фур'є-спектрометр
ЕЕЯ	Ефективна енергетична яскравість
КА	Космічний апарат
КЕ	Контрольний елемент
КТ	Космічний тепловізор
КПК	Коефіцієнт передачі контрасту
ЛСК	Локальна система координат
МПВ	Матричний приймач випромінювання
МРРТ	Мінімальна роздільна різниця температур
МБМ	Мікроболометрична матриця
ОЕС	Оптико-електронна система
ПВ	Приймач випромінювання
ПЗ	Поверхня Землі
СВРЗ	Сканер високої роздільної здатності
СНВРЗ	Сканер надвисокої просторової роздільної здатності
СРК	Система радіометричного калібрування
СЩЕЯ	Спектральна щільність енергетичної яскравості
СФС	Статичний Фур'є-спектрометр
ТПСС	Тепловізійна система спостереження
ФАК	Фотоелектричний автоколіматор
ФС	Фур'є-спектрометр
ЧЗН	Часова затримка накопичення
GSD	Ground sampling distance
TDI	Time delay integration

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день в світі спостерігається тенденція стрімкого прогресу в розвитку та використанні супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Число країн, які безпосередньо беруть участь в тому чи іншому проекті перевищило 30, а 24 з них мають власні супутники ДЗЗ. Сучасні технічні засоби ДЗЗ дозволяють отримувати цифрові зображення поверхні Землі з високим просторовим розділенням та в широкому діапазоні спектра електромагнітних хвиль. Це дозволяє отримувати більш детальну інформацію про об'єкти спостереження. Основною тенденцією останніх років є створення нових легких космічних апаратів (КА) ДЗЗ з підвищеним просторовим розділенням. Для цього потрібно: створення нових високочутливих приймачів випромінювання з малими розмірами пікселів та великим динамічним діапазоном; розробка нових компактних довгофокусних об'єктивів, які забезпечують високу світлосилу та дифракційну якість зображення; удосконалення методів зйомки; проектування та виготовлення легких асферичних дзеркал.

Застосування фотоприймачів з малим розміром пікселів призводить до покращення просторового розділення, але, в той же час, спричиняє різке зменшення енергетичного розділення. Тому для систем ДЗЗ високого розділення фірмами виробниками фоточутливих пристроїв (e2v, Teledyne Dalsa, Fairchild Imaging та інші) розробляються та виготовляються спеціальні ПЗЗ-лінійки з часовою затримкою накопичування (ЧЗН), які дозволяють підвищити енергетичне розділення систем ДЗЗ. Але застосування таких ПЗЗ-лінійок потребує новий підхід при проектуванні систем ДЗЗ, який би ураховував специфіку роботи таких фотоприймачів.

Співвідношення просторового розділення та масо-габаритних і цінових характеристик визначають конкурентну здатність системи ДЗЗ на світовому ринку. Ці характеристики суперечать один одному. Підвищення просторового розділення потребує збільшення фокусної відстані об'єктива та діаметра

світлової апертури, а для зменшення маси та габаритів потрібно їх зменшувати. Існуючі типи об'єктивів для систем ДЗЗ та методи їх проектування не дозволяють вирішити цю проблемну ситуацію.

Досі нема єдиного підходу при проектуванні для оптимального узгодження просторового й енергетичного розділення з масо-габаритними характеристиками систем ДЗЗ. Невирішеними залишаються і ряд проблем пов'язаних з збереженням просторового розділення в жорстких умовах експлуатації на орбіті цих систем та удосконаленням методів зйомки для підвищення просторового й енергетичного розділення.

Сучасні системи ДЗЗ – це високоточні вимірювальні прилади, які для забезпечення високого просторового та енергетичного розділення потребують калібрування багатьох параметрів. Вдосконалення методів калібрування ще один шлях підвищення просторового та енергетичного розділення.

Саме тому дослідження, які спрямовані на підвищення просторового та енергетичного розділення космічних систем ДЗЗ, вирішують актуальну проблему, яка має наукове та практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є результатом науково-дослідних робіт, які виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів та в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» за участю автора як відповідального виконавця згідно з:

- тематикою державних науково-дослідних робіт: «Забезпечення системного отримання даних від космічної системи «Січ». Розроблення та виготовлення льотних зразків оптичного сканера з просторовим розрізненням 2,5м» за договорами з ДКАУ: від 08.10.2015 р. №1-11/15 (0115U005428); від 06.12.2016 р. №1-24/16 (0116U008988); від 22.12.2017 р. №1-29/17 (0117U005419); «Забезпечення системного отримання даних від космічної системи «Січ». Розроблення та виготовлення льотних зразків сканера

дальнього інфрачервоного діапазону» за договорами з ДКАУ: від 01.10.2015 р. №1-10/15 (0115U005429) та від 06.12.2016 р. №1-23/16 (0116U008989);

- тематикою госпдоговірних робіт: «Технологія підвищення просторового розділення зображень, що отримуються матричною знімальною камерою космічної системи «Січ» за допомогою субпіксельної обробки» за договором № 10 відповідно до розпорядження Президії НАН України від 27.02.2013 р. № 133 (РК № 0113U000913); «Розробка методів розрахунку просторового і енергетичного розділення ІЧ камери космічного базування з мікроболометричною матрицею» за договором № 453/4 від 29.05.2013 р.; «Фізична модель ІЧ спектро радіометра з підвищенням просторового розділення за допомогою субпіксельної обробки зображень» за договором № 13 відповідно до розпорядження Президії НАН України від 05.03.2014 №142 (РК № 0114U001665); НДР №2721п «Розробка методів і розрахункового інструментарію для об'єктивної оцінки просторового і енергетичного розділення космічних ІЧ камер ДЗЗ» (0114U003421).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення наукової проблеми підвищення якості зображення в космічних оптико-електронних системах (ОЕС) дистанційного зондування Землі шляхом удосконалення методів проектування та контролю їх основних характеристик.

Мета досягається вирішенням наступних задач:

1. Обґрунтувати необхідність створення ОЕС ДЗЗ з підвищеною роздільною здатністю на основі аналізу існуючих систем, їх характеристик та тенденцій їх розвитку.
2. Удосконалити і дослідити узагальнену фізико-математичну модель ОЕС космічних сканерів високого і надвисокого просторового розділення.
3. Розробити і дослідити абераційні моделі нових оптичних систем сканерів ДЗЗ високого та надвисокого просторового розділення.
4. Удосконалити і дослідити узагальнену фізико-математичну модель інфрачервоної системи спостереження космічного базування.

5. Дослідити переваги та недоліки оптичних систем гіперспектрометрів, які використовують призми та дифракційні ґратки, а також зображувальних Фур'є-спектрометрів.
6. Розробити методи вимірювання основних характеристик космічних оптико-електронних систем ДЗЗ, а саме геометричне і радіометричне калібрування, коефіцієнт розсіювання об'єктів, деформація дзеркал об'єктива.
7. Дослідити тепловізійну камеру космічного базування з мікроболометричною матрицею, а саме: мінімальну роздільну різницю температур (MRPT) камери, MRPT з субпіксельним зміщенням і обробкою зображень, а також удосконалити методи дистанційного вимірювання температури земної поверхні інфрачервоним (ІЧ) спектрорадіометром.
8. Провести експериментальні дослідження розроблених методів проектування об'єктів для систем ДЗЗ з заданими властивостями.

Об'єктом дослідження є процес формування зображення в космічних оптико-електронних системах ДЗЗ різного призначення, що працюють в видимому і інфрачервоному діапазонах випромінювання.

Предметом дослідження є методи підвищення просторового та енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем ДЗЗ.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач в роботі використовуються аналітичні, чисельні і експериментальні методи дослідження. Аналітичні методи базувалися на математичному моделюванні процесів перетворення інформації від об'єкта спостереження до приймача випромінювання ОЕС, а також теорії аберацій оптичних систем. Чисельні методи використовували комп'ютерні програми ZEMAX. Експериментальні методи використовувалися для перевірки достовірності розроблених методів проектування оптичних систем та методів контролю ОЕС ДЗЗ.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше отримано аналітичні залежності, що зв'язують конструктивні параметри об'єktivів для отримання дифракційної якості зображення, які покладені в основу експрес-методу розрахунку двох типів об'єktivів - трьохдзеркального квазіортоскопічного об'єktivу з позаосьовим збільшеним полем зору та трьохдзеркального вісесиметричного об'єktivу.

2. Запропоновано новий метод для підвищення просторового розділення в ІЧ багатоспектральних космічних ОЕС ДЗЗ, який полягає в сумісній обробці субпіксельно зміщених зображень від різних спектральних діапазонів, які попередньо перераховані на єдину фізичну величину, незалежну від спектрального діапазону, температуру Земної поверхні.

3. Запропоновано новий підхід та отримані аналітичні залежності розрахунку трьохлінзового атермального об'єktivу для ІЧ області спектру, які поєднують вибір характеристик матеріалів, оптичних сил лінз та відстаней між ними для утримання площини фокусування об'єktivу в площині фотоприймача при різних температурах експлуатації ОЕС.

4. Уточнено математичну модель формування й перетворення інформації в тепловізійній камері при її космічному базуванні та отримано нове рівняння для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур (MRPT), яке враховує роботу тепловізійної камери без участі спостерігача.

5. Вперше запропоновано новий метод вимірювання коефіцієнтів розсіювання об'єktivів, який базується на порівнянні освітленостей в фокальній площині об'єktivа виробу при освітленні його вхідного отвору джерелом випромінювання при двох положеннях джерела випромінювання відносно вхідного отвору об'єktivа.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

1. Визначено залежності діаметра світлової апертури об'єktivа від необхідного просторового розділення, висоти орбіти КА і спектрального діапазону. Запропоновані критерії вибору оптимального значення апертури дозволяють зробити вибір параметрів об'єktivа для отримання необхідної якості зображення при мінімальних габаритних та вагових характеристиках

системи на початкових етапах проектування.

2. Запропонований метод розрахунку величини проєкції пікселя та нахилу рядків та стовбців матриці фотоприймача на поверхні Землі дозволяє отримати характеристики просторової роздільної здатності та якості зображення при зйомці поверхні Землі при відхиленні від надиру, оцінити вплив характеристик платформи КА на якість зображення.

3. Отримані формули для розрахунку конструктивних параметрів об'єтивів, що лягли в основу експрес-методу розрахунку, дозволяють швидко розрахувати два типи трьохдзеркальних об'єтивів з п'ятьма виправленими аберациями для систем ДЗЗ високої та надвисокої роздільної здатності. На розроблену за цим методом оптичну схему об'єктива були отримано патент України на винахід №94303, МПК G02B 17/00 та акти впровадження.

4. Запропонований метод космічної зйомки та отримані формули для розрахунку роздільної здатності та узгодження параметрів об'єктива й мікроболометричної матриці дозволяють на етапі проектування оцінити та оптимально узгодити характеристики окремих елементів космічної ІЧ системи спостереження

5. Отримані аналітичні залежності розрахунку трьохлінзового атермального об'єктива для ІЧ області спектру дозволяють отримати об'єктив з новими експлуатаційними якостями.

6. Методи геометричного та радіометричного калібрування дозволяють провести атестацію ОЕС ДЗЗ для відповідності міжнародним стандартам знімків, що будуть отримані такими системами.

7. Новий метод вимірювання коефіцієнтів розсіювання об'єктів дозволить значно зменшити габарити та спростити й здешевити виготовлення вимірювального стенду, а також визначати не тільки коефіцієнт розсіювання, а і його складові розсіювання від оптичних і механічних елементів. На цей метод було отримано патент України на винахід №103242, МПК G01M 11/02, G02B 13/00.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є узагальненням результатів майже дванадцятирічних досліджень автора. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримані здобувачем самостійно. Всі результати дисертації, які виносяться на захист, отримані автором особисто.

Дисертаційна робота виконана в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» та Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Науковий консультант д.т.н., професор Колобродов В.Г. Робота є результатом самостійних досліджень Тягура В.М.

Без співавторства опубліковано дві статті та шість тез доповідей [12,14,36, 56,71,72,79,83].

В опублікованих у співавторстві наукових працях внесок автора є наступним: зроблено аналіз мікроболометричних передавальних камер для дистанційного зондування Землі із космосу [1]; запропоновано і досліджено метод ахроматизації оптичних систем об'єтивів для тепловізорів [2]; запропоновано новий метод для вимірювання коефіцієнтів розсіювання [3]; запропонована і досліджена модель космічного тепловізора, яка не враховує дисплей і оператора [4]; розроблено структурну схему установки для вимірювання коефіцієнта розсіювання об'єтивів [5]; досліджена модуляційна передавальна функція тепловізора з мікроболометричною матрицею [6]; запропонована класифікація зображуючих Фур'є-спектрометрів [7]; запропонована нова оптична система тридзеркального анастигматичного об'єктива з позаосьовим полем зору [8]; досліджено метод підвищення роздільної здатності спектрорадіометра при реєстрації субпіксельно зміщених зображень [9]; запропоновано математичну модель для розрахунку деформації поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал [10]; розроблена геометрична модель для дослідження енергетичного розділення оптико-електронної системи космічного сканера [11]; розроблено алгоритм розрахунку оптичних дзеркал при наявності деформацій [13];

досліджено процес зміни форми проекції пікселя сканера на поверхні Землі при зміні кута візування [15]; отримана формула для дослідження просторового розділення сканера, яка враховує кривизну поверхні Землі [16]; досліджена МПФ ОЕС при відхиленні осі візування від надира [17]; запропоновано метод геометричної калібровки кутових параметрів сканера ДЗЗ [18]; запропоновано і розглянуто оптимальний склад бортового оптико-електронного комплексу перспективного супутника ДЗЗ [19]; запропоновано метод розрахунку роздільної здатності при реєстрації субпіксельно зміщених зображень [20]; розроблена система рівнянь для розрахунку конструктивних параметрів атермалізованого ІЧ об'єктива ахромата [21]; запропонована оптична система космічного спектрорадіометра високого просторового розділення [22]; досліджено спосіб формування зображення за допомогою оптико-електронного сканера космічного базування [23]; запропоновано оптичну систему три дзеркального анастигматичного об'єктива для сканера високого розділення [24]; досліджено метод підвищення просторового розділення багато спектрального космічного сканера [25]; запропоновано ввести до спектрометра додаткове дзеркало [26]; розроблено алгоритм вимірювання коефіцієнта розсіювання [27]; досліджено термічні аберації ІЧ об'єктива [28]; запропоновано метод формування субпіксельно зміщених зображень [29]; оптимізовано конструктивні параметри тридзеркального анастигматичного об'єктива [30]; запропоновано перераховувати зображення різних спектральних каналів на єдину фізичну величину [31]; проаналізовані досягнення і проблеми розвитку ОЕС ДЗЗ [32]; обґрунтовані можливість використання космічних гіперспектрометрів в різних сферах народного господарства [33]; розроблено програму для розрахунку оптичних елементів [34]; розроблено алгоритм розрахунку просторового розділення сканера системи ДЗЗ [35]; розроблені дві оптичні системи ІЧ об'єктивів тепловізорів [37]; досліджена фізико-математична модель багатоспектральної супутникової системи спостереження [38]; запропоновано оптичні системи спектрального сканера ДЗЗ [39]; розроблено метод і апаратуру для кутової

калібровки ОЕП [40]; запропоновано алгоритм обробки субпіксельних зображень [41]; розроблено модель визначення розсіювання об'єктива [42]; запропонована схема для вимірювання розсіювання [43]; удосконалена схема для вимірювання розсіювання в об'єктиві [44]; запропонована модель космічного тепловізора на МБМ [45]; розроблена система рівнянь для проектування ІЧ об'єктива [46]; розроблена структура стенду для вимірювання МРРТ [47]; досліджено метод субпіксельної обробки ІЧ зображень [48]; обґрунтована можливість використання МБМ в ОЕС ДЗЗ [49]; запропоновано нові критерії оцінки ефективності ІЧ ОЕС [50]; запропоновано основні характеристики ІЧ камер ДЗЗ [51]; проведено розрахунок оптичної системи спектрометра [52]; обґрунтована доцільність використання субпіксельних кадрів [53]; досліджена модель нового ІЧ спектрорадіометра [54]; досліджена математична модель тепловізора з субпіксельною обробкою зображень [55]; запропоновано метод підвищення розділення ІЧ камери [57]; досліджено просторове розділення ІЧ камери ДЗЗ [58]; досліджена модель зображуючого фур'є-спектрометра [59]; розроблено методики проведення контролю тепловізорів [60]; запропоновано метод вимірювання коефіцієнта розсіювання [61]; запропоновано метод узгодження параметрів об'єктива і МБМ [62]; досліджена модель зображувального спектрометра для ДЗЗ [63]; запропоновано метод вимірювання випромінювання Землі [64]; запропоновано метод контролю контролю форми дзеркал [65]; досліджена модель полегшення дзеркал космічного базування [66]; отримано МПФ МБМ з субпіксельною реєстрацією зображень [67]; проведено аналіз впливу деформацій дзеркала на його ФРТ [68]; розроблена модель деформації поверхні дзеркала [69]; запропоновано метод підвищення розділення спектрорадіометра [70]; розроблено метод вимірювання характеристик тепловізора [73]; обґрунтована доцільність використання мінімальної сприймаючої різниці температур [74]; отримано аналітичний вираз функції розсіювання точки [75]; запропоновано метод контролю асферичних дзеркал [76]; проведено комп'ютерне моделювання кріплення

дзеркал [77]; отримана формула для дослідження просторового розділення сканера при зміні кута візування [78]; запропоновано схему довгофокусного дзеркального об'єктива [80]; досліджено метод підвищення просторового розділення ІЧ камер, який ґрунтується на узгодженні параметрів об'єктива і МБМ [81]; запропоновано для оцінки ефективності використовувати просторове і енергетичне розділення [82].

4. Апробація результатів дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження обговорювалися на 24 науково-технічних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (м.Київ, 2010 - 2018 рр.); Перша Всеукраїнська конференція з запрошенням закордонних учасників (м. Київ, 2008); VIII Міжнародна науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях” (п. Рибачье, Крим, 2009 р.); 22nd General Congress of the International Commission for Optics (ICO-22) (Puebla, Mexico, 2011), Международная научная конференция «Независимый Казахстан: 20 лет развития космических исследований» (г.Алматы, Казахстан, 2011 г.); IX and X International Conference on Digital Technologies (м. Жиліна, Словачія, 2013, 2014 рр.); XI Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2013» (м. Київ, 2013 р.); 14-та Українська конференція з космічних досліджень (м. Ужгород, 2014 р.); 15-та та 16-та Українська конференція з космічних досліджень (м. Одеса, 2015-2016 р.р.); Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування» (м. Київ, 2014 р.); China-Ukraine forum on Science and Technology (Harbin, China, 2016); II Українська конференція «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи» (м. Київ 2016 р.); 6-я Международная конференция «Космические технологии: Настоящее и будущее» (г. Днепр, 2017); III Українська конференція «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи» (м. Київ 2018 р.);

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 83 наукові праці, у тому числі 1 монографія, 21 стаття у наукових фахових виданнях (з них 4 статті у виданнях іноземних держав, 17 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 9 патентів на винахід, 52 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та об'єм дисертації.

Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури та 8 додатків. Повний об'єм дисертації 388 сторінок з об'ємом основного тексту ≈ 250 сторінок. Дисертація містить 100 рисунків, 22 таблиці, список використаної літератури з 267 найменувань на 34 сторінках і 8 додатків на 48 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Метою цього розділу є обґрунтувати необхідність створення оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі з підвищеною просторовою роздільною здатністю на основі аналізу існуючих систем, їх характеристик та тенденцій їх розвитку.

Для цього в розділі розглядаються:

1. Призначення та основні характеристики оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі.
2. Оптико-електронні системи спостереження високого та надвисокого просторового розділення.
3. Інфрачервоні оптико-електронні системи спостереження космічного базування.
4. Гіперспектральні системи дистанційного зондування Землі.
5. Формулювання основної проблеми і задач дослідження дисертаційної роботи на основі проведеного аналізу.

1.1 Призначення та основні характеристики оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі

До складу сучасних супутників ДЗЗ можуть входити наступні типи іконічної апаратури [1–10]: багато спектральні оптико-механічні сканери, багато спектральні сканери з ПЗЗ-лінійкою, гіперспектральні сканери, тепловізійні системи спостереження, лазерні скануючі системи, радіолокаційні сканери з синтезованою апертурною антеною, скануючі мікрохвильові радіометри. Світовий досвід створення супутникових систем ДЗЗ свідчить про те, що лазерні, радіолокаційні та мікрохвильові системи дуже відрізняються від других сенсорів по специфіці вирішення тематичних

завдань, конструкції і потребують розміщення на спеціальних космічних платформах, тому їх можна виключити з огляду оптико-електронних систем ДЗЗ.

Ефективність застосування оптико-електронних систем ДЗЗ для вирішення конкретної практичної або наукової задачі визначається, перш за все їх узагальненими характеристиками. На думку автора до таких найбільш важливих характеристик можна віднести [1–10]:

1. Робочий спектральний діапазон.
2. Просторове розділення або просторову роздільну здатність.
3. Енергетичне розділення.
4. Спектральне розділення.
5. Проекція пікселя на поверхні Землі (GSD – ground sampling distance).
6. Ширина смуги захвату.
7. Кількість спектральних каналів.

У світі існує стійкий попит на багатоспектральні сканери високої роздільної здатності. В 2011 р. було запущено український супутник ДЗЗ «Січ-2», а раніше єгипетський супутник ДЗЗ «Egypsat-1», які в своєму складі мали багатоспектральний сканер ОМБ МСУ з просторовим розділенням на поверхні Землі 7,8 м в чотирьох спектральних каналах та ОМБ ССІЧ з просторовим розділенням 40 м [11,12,13]. Ці супутники були виготовлені підприємствами і організаціями України. В 2020 р. планується до запуску український супутник «Січ-2-1» на якому теж буде встановлено багатоспектральний сканер ОМБ МСУ.

Для багатоспектрального сканера ОМБ МСУ було розроблено дзеркально-лінзовий об'єктив з фокусною відстанню $f' = 860$ мм з якістю зображення близькою до дифракційної межі [14].

1.2 Оптико-електронні системи спостереження високого та надвисокого просторового розділення

За останні 10-15 років оптико-електронні системи (ОЕС) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) надвисокої роздільної здатності стали основними джерелами отримання детальної інформації з космосу. Зазвичай, супутники ДЗЗ літають на сонячно-синхронних кругових орбітах висотою 600-800 км і нахилом площини орбіти до площини екватора приблизно 98° . Така орбіта дозволяє пролітати над тим же самим об'єктом на поверхні Землі в один і той же сонячний час, що створює однакові умови освітлення об'єкта при різних прольотах супутника над об'єктом. Просторове розділення таких систем складає менше 1 м [15]. Іноді таке просторове розділення досягають за рахунок зменшення висоти орбіти, але такий шлях має певні труднощі в реалізації і використовується не так часто.

Однією із важливих тенденцій розвитку космічних апаратів (КА) ДЗЗ є зменшення їх габаритів і ваги без погіршення характеристик системи. Це значно скорочує строки і ціну створення та запуску таких малих апаратів. На рис. 1.1 наведено класифікацію КА ДЗЗ в залежності від маси, а також вартість та термін створення, яка запропонована німецьким центром авіації і космонавтики DLR [16].

Завдяки такій тенденції все більш країн, які не мали власної космічної індустрії, стали запускати КА ДЗЗ високого та надвисокого просторового розрізнення в співпраці з передовими космічними державами.

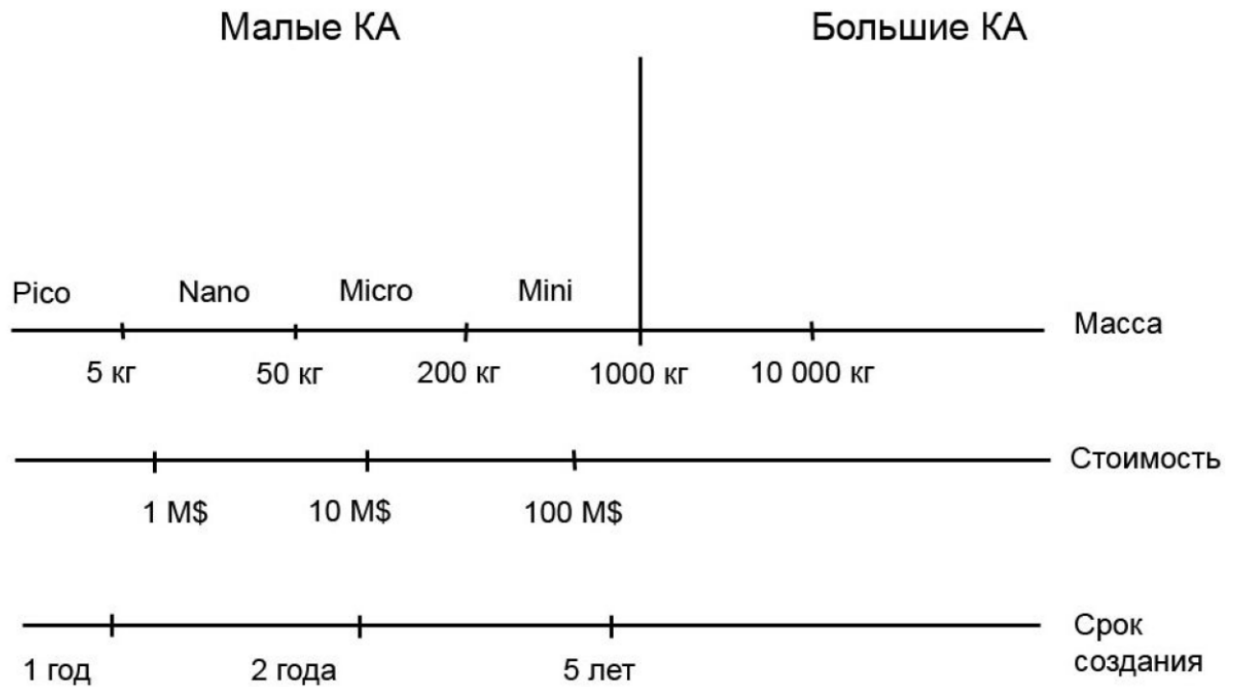


Рис. 1.1. Класифікація космічних апаратів по масі [16]

Комерційний супутник “Ikonos-2”, який було запущено у 1999 р., відкрив нову еру в цивільному комерційному спостереженні Землі з просторовим розділенням 1 м [16]. Його було запущено на сонячно-синхронну кругову орбіту висотою 681 км, нахил якої складав 98,1°. При гарантійному терміні експлуатації 7 років він уже понад 15 років працює на орбіті. ОЕС для нього була спроектована і виготовлена компанією «Kodak Co.». Вона забезпечує проекцію пікселя на Землі (GSD – ground sampling distance) $P = 0,82$ м в панхроматичному спектральному діапазоні $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,9$ мкм, та $P = 3,2$ м в чотирьох спектральних діапазонах ($\Delta\lambda_1=0,45-0,53$ мкм; $\Delta\lambda_2=0,52-0,61$ мкм; $\Delta\lambda_3=0,64-0,72$ мкм; $\Delta\lambda_4=0,76-0,86$ мкм) при ширині смуги захвату 11 км. Оптична схема була побудована на базі трьохдзеркального анастигматичного об'єктива Корша з фокусною відстанню 10000 мм, світловою апертурою головного дзеркала 700 мм, відносним отвором 1:14,3 і полем зору $2\omega=0,93^\circ$. ОЕС працює як «push-broom» сканер і в якості фотоприймачів використовуються ПЗЗ-лінійка з 13500 пікселями розміром 12×12 мкм і можливістю часової затримки

накопичування (TDI – time delay integration) для панхроматичного каналу і ПЗЗ-лінійка з 3375 пікселями розміром 48×48 мкм для чотирьох спектральних каналів, конструктивно розміщених в одному корпусі. Вага ОЕС складає 171 кг, габарити $\varnothing 0,8 \times 1,53$ м, а споживана потужність 350 Вт [17,18].

В 2001 році на сонячно-синхронну орбіту висотою 450 км було запущено супутник ДЗЗ “Quick Bird-2” американської компанії “Digital Globe”. ОЕС BHRC-60 (Ball’s High Resolution Camera) американської компанії «Ball Aerospace & Technologies Corp.» при висоті орбіти 681 км забезпечувала $GSD P = 0,93$ м в панхроматичному спектральному діапазоні $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,9$ мкм, та $P = 3,7$ м в чотирьох спектральних діапазонах ($\Delta\lambda_1=0,45-0,53$ мкм; $\Delta\lambda_2=0,52-0,6$ мкм; $\Delta\lambda_3=0,63-0,69$ мкм; $\Delta\lambda_4=0,76-0,9$ мкм) при ширині смуги захвату 25 км. Об’єктив BHRC-60 являє собою позаосьовий трьохдзеркальний анастигматичний об’єктив без екранування вхідної зіниці з фокусною відстанню 8800 мм, світловою апертурою головного дзеркала 600 мм, відносним отвором 1:14,7 і полем зору $2\omega=2,12^\circ$. Вузол фокальної площини складають ПЗЗ-лінійки аналогічні тим, що застосовуються в “Ikonos-2”, і мають 27000 пікселів для панхроматичного каналу і 6700 пікселів для спектральних каналів. Вага ОЕС складає 138 кг, габарити $1,15 \times 1,41 \times 1,95$ м, а споживана потужність 430 Вт [19].

Компанія “Digital Globe” є комерційним оператором декількох супутників ДЗЗ надвисокої роздільної здатності. Крім супутників “Quick Bird-2” та “Ikonos-2” вона запустила на орбіту ще ряд супутників з дуже високими характеристиками. Це, перш за все, “WorldView-1”, який використовує той самий об’єктив, що було встановлено в “Quick Bird-2”, але тільки з одним панхроматичним спектральним каналом, “WorldView-2”, “WorldView-3” та “GeoEye”. “WorldView-2” було запущено в 2009 р. на орбіту висотою 770 км. Цей супутник відкрив нову еру в комерційних системах ДЗЗ своєю здатністю робити знімки з просторовим розрізненням

менш ніж 0,5 м. При висоті орбіти 681 км він забезпечує GSD $P = 0,41$ м в панхроматичному спектральному діапазоні $\Delta\lambda_{\text{PAN}}=0,45\text{-}0,8$ мкм та $P = 1,64$ м в восьми спектральних діапазонах ($\Delta\lambda_1=0,40\text{-}0,45$ мкм; $\Delta\lambda_2=0,45\text{-}0,51$ мкм; $\Delta\lambda_3=0,51\text{-}0,58$ мкм; $\Delta\lambda_4=0,585\text{-}0,625$ мкм; $\Delta\lambda_5=0,63\text{-}0,69$ мкм; $\Delta\lambda_6=0,705\text{-}0,745$ мкм; $\Delta\lambda_7=0,77\text{-}0,895$ мкм; $\Delta\lambda_8=0,86\text{-}1,04$ мкм;) при ширині смуги захвату 16,4 км. Об'єктив було розроблено і виготовлено компанією "ITT Corporation's Space Systems" по схемі Корша з фокусною відстанню 13300 мм, світловою апертурою головного дзеркала 1100 мм, відносним отвором 1:12 і полем зору $2\omega=1,28^\circ$. В фокальній площині розміщені TDI ПЗЗ-лінійки з розміром пікселя 8×8 мкм для пан хроматичного каналу і 32×32 мкм для спектральних каналів. Висота об'єктива складає 3 м [20]. В 2014 р. компанія запустила ще один супутник "WorldView-3" на орбіту висотою 617 км. На супутнику встановлено той самий об'єктив, що і на "WorldView-2", але завдяки меншій висоті супутник має просторове розрізнення $P = 0,31$ м в панхроматичному каналі і $P = 1,24$ м в восьми спектральних каналах. Крім того, сканер має додатково вісім короткохвильових інфрачервоних каналів від 1,2 мкм до 2,4 мкм з просторовим розділенням $P = 3,7$ м [21].

В 2006 р. на сонячно-синхронну орбіту висотою 500 км було запущено супутник "EROS-B", який розроблено ізраїльською компанією "Israel Aircraft Industries". При висоті орбіти 681 км він забезпечує GSD $P = 0,91$ м в панхроматичному спектральному діапазоні $\Delta\lambda_{\text{PAN}}=0,5\text{-}0,9$ мкм при ширині смуги захвату 9 км. Телескоп для ОЕС розроблено фірмою "ElOp" (Electro Optical Industries) по схемі об'єктива Річі-Кретьєна. Він має фокусну відстань 8250 мм, світлову апертуру головного дзеркала 500 мм, відносний отвір 1:16,5 і поле зору $2\omega=0,8^\circ$. Поле зору формують дві TDI ПЗЗ-лінійки по 10151 піксель розміром 11×11 мкм [22].

Супутник "GeoEye-1", відомий також як «Orb View-5», компанії "GeoEye" було запущено в 2007 р. на сонячно-синхронну орбіту висотою 684 км. Сканер для нього розроблено і виготовлено компанією «ITT Space

Systems Division», яка була відокремлена від «Kodak Co.». Він забезпечує просторове розділення $GSD \quad P = 0,41 \text{ м}$ в панхроматичному спектральному діапазоні $\Delta\lambda_{PAN}=0,45\text{-}0,9 \text{ мкм}$, та $P = 1,64 \text{ м}$ в чотирьох спектральних діапазонах ($\Delta\lambda_1=0,45\text{-}0,51 \text{ мкм}$; $\Delta\lambda_2=0,52\text{-}0,58 \text{ мкм}$; $\Delta\lambda_3=0,655\text{-}0,69 \text{ мкм}$; $\Delta\lambda_4=0,78\text{-}0,92 \text{ мкм}$) при ширині смуги захвату $15,2 \text{ км}$. Оптична схема об'єктива побудована на базі тридзеркального анастигматичного об'єктива Корша з фокусною відстанню 13300 мм , світловою апертурою головного дзеркала 1100 мм , відносним отвором $1:12,1$ і полем зору $2\omega=1,28^\circ$. Необхідну смугу захвату формують ПЗЗ-лінійки з сумарною кількістю пікселів 35000 розміром $8\times 8 \text{ мкм}$ в панхроматичному каналі, та по 9300 пікселів розміром $32\times 32 \text{ мкм}$ в кожному спектральному каналі. ПЗЗ-лінійки, як для панхроматичного, так і для спектральних каналів виконані по технології TDI, а, крім того, ПЗЗ-лінійки спектральних каналів розташовані в одному корпусі. Вага ОЕС складає 452 кг , габарити $\varnothing 1,5\times 3 \text{ м}$ [23].

В 2007, 2008 та 2010 роках було запущено серію індійських супутників ДЗЗ “CartoSat-2”, “CartoSat-2A” і “CartoSat-2B”. Висота орбіти складає 635 км . З висоти орбіти 680 км вони забезпечують проекцію пікселя на Землі $P = 0,85 \text{ м}$ в панхроматичному спектральному діапазоні $\Delta\lambda_{PAN}=0,45\text{-}0,85 \text{ мкм}$ при ширині смуги захвату $9,6 \text{ км}$. В сканері використовується об'єктив Рітчі-Кретьєна з фокусною відстанню 5600 мм , світловою апертурою головного дзеркала 700 мм , відносним отвором $1:8$ і полем зору $2\omega=0,87^\circ$. В якості фотоприймача використовується ПЗЗ-лінійка з 12288 пікселями розміром $7\times 7 \text{ мкм}$. Вага ОЕС складає 120 кг , габарити $\varnothing 0,76\times 1,6 \text{ м}$, а споживана потужність 60 Вт [24].

Корейський супутник ДЗЗ “Kompsat-2”, який було розроблено фірмою “Korea Aerospace Research Institute”, було запущено в 2006 р. на орбіту висотою 685 км . Він забезпечує проекцію пікселя $P = 1 \text{ м}$ в панхроматичному каналі $\Delta\lambda_{PAN}=0,5\text{-}0,9 \text{ мкм}$ і $P = 4 \text{ м}$ в чотирьох спектральних діапазонах ($\Delta\lambda_1=0,45\text{-}0,52 \text{ мкм}$; $\Delta\lambda_2=0,52\text{-}0,6 \text{ мкм}$; $\Delta\lambda_3=0,63\text{-}$

0,69 мкм; $\Delta\lambda_4=0,76-0,9$ мкм) при ширині смуги захвату 15 км. Багатоспектральний сканер було розроблено фірмою “Korea Aerospace Research Institute” спільно з ізраїльською компанією «ElOp» і німецькою «ОНВ-System». Об’єктив побудовано по схемі Річі-Кретьєна з фокусною відстань 9000 мм для панхроматичного каналу і 2250 мм для спектральних каналів. Він має головне дзеркало діаметром 600 мм, відносний отвір 1:15 для панхроматичного каналу та 1:3,75 для спектральних каналів і поле зору $1,25^\circ$. Різниця фокусних відстаней для панхроматичного і спектральних каналів досягається використанням різних лінзових систем, які розташовані перед фокальною площиною двох дзеркального об’єктива. В панхроматичному каналі використовуються три ПЗЗ-лінійки по 5200 пікселів розміром 13×13 мкм, виконаних по технології TDI і чотири ПЗЗ-лінійки по 5200 пікселів розміром 13×13 мкм для спектральних каналів. Вага сканеру 75 кг, споживана потужність 350 Вт [25, 26].

В 2011 і в 2012 роках на орбіту висотою 694 км було запущено французькі космічні апарати ДЗЗ «Pleiades-1A» та «Pleiades-1B». Вони забезпечують просторове розділення $GSD\ P = 0,7$ м в панхроматичному спектральному діапазоні $\Delta\lambda_{PAN}=0,48-0,82$ мкм та $P = 2,8$ м в чотирьох спектральних діапазонах ($\Delta\lambda_1=0,45-0,53$ мкм; $\Delta\lambda_2=0,51-0,59$ мкм; $\Delta\lambda_3=0,62-0,7$ мкм; $\Delta\lambda_4=0,775-0,915$ мкм) при ширині смуги захвату 20 км. Телескоп, який було розроблено фірмою «Alcatel Alenia Space» по схемі Корша, має фокусну відстань 12905 мм, світлову апертуру головного дзеркала 650 мм, відносний отвір 1:20 і поле зору $1,65^\circ$. Вузол фокальної площини містить п’ять TDI ПЗЗ-лінійок CCD98-50s по 6000 пікселів розміром 13×13 мкм для панхроматичного каналу і п’ять чотирьох спектральних ПЗЗ-лінійок AT71554 по 1500 пікселів розміром 52×52 мкм. Вага ОЕС складає 195 кг, габарити $2,24\times 1,6\times 0,98$ м, а споживана потужність 400 Вт [27,28].

В 2012 році було запущено корейський супутник “Kompsat-3”, а в 2015 році його двійник “Kompsat-3A”. Висота орбіти “Kompsat-3” 685 км, а

“Kompsat-3A” – 528 км. “Kompsat-3” забезпечує проекцію пікселя $P = 0,7$ м в панхроматичному каналі $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,9$ мкм і $P = 2,8$ м в чотирьох спектральних каналах ($\Delta\lambda_1=0,45-0,52$ мкм; $\Delta\lambda_2=0,52-0,6$ мкм; $\Delta\lambda_3=0,63-0,69$ мкм; $\Delta\lambda_4=0,76-0,9$ мкм) при ширині смуги захвату 15 км. Об’єктив сканера побудовано на базі об’єктива Корша з допоміжним четвертим ввігнутим асферичним дзеркалом. Об’єктив має фокусну відстань 8600 мм, світлову апертуру головного дзеркала 750 мм, відносний отвір 1:11,5 та поле зору $1,25^\circ$. Поле зору панхроматичного каналу формують дві TDI ПЗЗ-лінійки CCD10121 по 12288 пікселів розміром $8,75 \times 8,75$ мкм, а поле зору спектральних каналів формують 8 TDI ПЗЗ-лінійок по 6000 пікселів розміром $2 \times 17,5$ мкм. Вага сканера складає 80 кг а габарити $\varnothing 1,3 \times 2,1$ м [29].

Японія має два супутника ДЗЗ з апаратурою надвисокої роздільної здатності. Це супутник “ASNARO”, який було запущено в 2014 році та “ALOS-3”, який запущено в 2016 році. “ASNARO” запущено на орбіту висотою 504 км і з цієї висоти він забезпечує проекцію пікселя $P = 0,5$ м в панхроматичному каналі і $P = 2$ м в шістьох спектральних каналах при ширині смуги захвату 10 км. Сканер з об’єктивом Корша було виготовлено фірмою NEC and NTSspace (NEC Toshiba Space Systems Ltd.). Вага OEC складає 97 кг, а споживана потужність 140 Вт [30].

Висота орбіти супутника “ALOS-3” 618 км. OEC “PRISM-2” (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping-2) забезпечує просторове розділення $P = 0,8$ м в панхроматичному каналі $\Delta\lambda_{PAN}=0,52-0,77$ мкм при ширині смуги захвату 50 км. В фокальній площині тридзеркального позаосьового об’єктива встановлено вісім TDI ПЗЗ-лінійок, які разом складають смугу з 65000 пікселів. Головне дзеркало об’єктиву має розміри $0,9 \text{ м} \times 0,6 \text{ м}$ [31].

В 2006 році Росія запустила супутник ДЗЗ “Ресурс-ДК”. Його особливістю є еліптична орбіта з висотами від 350 км до 610 км. З висоти 350 км лінзовий об’єктив з фокусною відстанню 4000 мм і діаметром 500 мм

забезпечує в панхроматичному каналі просторове розділення $P=1$ м і $P=3$ м в трьох спектральних каналах при ширині смуги захвату 28 км. Маса сканера складає 310 кг [32].

В 2014 році Китай теж вивів на орбіту висотою 631 км супутник “Gaofen-2” з ОЕС надвисокого просторового розділення. На супутнику встановлено два сканера для збільшення смуги захвату до 45 км, кожен з яких забезпечує в панхроматичному каналі $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,9$ мкм просторове розділення $P=0,81$ м і $P=3,24$ м в чотирьох спектральних каналах ($\Delta\lambda_1=0,45-0,52$ мкм; $\Delta\lambda_2=0,52-0,59$ мкм; $\Delta\lambda_3=0,63-0,69$ мкм; $\Delta\lambda_4=0,77-0,89$ мкм) при ширині смуги захвату 22,5 км. Об’єктив побудовано по схемі осьового трилінзового анастигматичного об’єктиву ТМА (Three Mirror Anastigmatic) з фокусною відстанню 7800 мм, світловим діаметром головного дзеркала 520 мм, відносним отвором 1:15 і кутом поля зору $2\omega=2,1^\circ$. Габаритні розміри двох камер складають $1500\times700\times1000$ мм, вага 300 кг, а споживана потужність 280 Вт [33].

Оптико-електронна система HiRAIS (High Resolution Advanced Imaging System), що була розроблена фірмою SI (Satrec Initiative) Daejeon, Korea, була встановлена на супутнику “DubaiSat-2” Об’єднаних Арабських Еміратів, який було запущено в 2013 році [34], та на іспанському супутнику “Deimos-2”, який було запущено в 2014 році [35]. ОЕС HiRAIS забезпечує з висоти орбіти 600 км просторове розділення $P=1$ м в панхроматичному каналі $\Delta\lambda_{PAN}=0,55-0,9$ мкм та $P=4$ м в чотирьох спектральних діапазонах ($\Delta\lambda_1=0,45-0,52$ мкм; $\Delta\lambda_2=0,52-0,59$ мкм; $\Delta\lambda_3=0,63-0,69$ мкм; $\Delta\lambda_4=0,77-0,89$ мкм). Об’єктив побудовано по удосконаленій схемі Корша з фокусною відстанню 5700 мм, світловим діаметром головного дзеркала 420 мм, відносним отвором 1:14,25, кутом поля зору $2\omega=1,2^\circ$ та шириною смуги захвату 12 км.

В 2009 році четверо студентів з Стенфордського університету створили компанію Skybox Imaging Inc. та розробили і запустили серію комерційних мікросупутників “SkySat” для комерційного дистанційного спостереження

Землі. Космічні апарати “SkySat-4, 5, 6,7 ” було запущено на орбіту висотою 695 км в 2016 році. ОЕС забезпечує в панхроматичному каналі $\Delta\lambda_{\text{PAN}}=0,45-0,9$ мкм просторове розділення $P = 0,9$ м і $P = 2$ м в чотирьох спектральних каналах ($\Delta\lambda_1=0,45-0,52$ мкм; $\Delta\lambda_2=0,52-0,59$ мкм; $\Delta\lambda_3=0,61-0,69$ мкм; $\Delta\lambda_4=0,74-0,9$ мкм) при ширині смуги захвату 8 км. Об’єктив побудовано по схемі Річі-Кретьєна з фокусною відстанню 3600 мм, в фокальній площині якого розташовано три CMOS матриці розміром 2560×2160 і розміром пікселя 6,5 мкм. Верхні половинки матриць працюють в панхроматичному спектральному діапазоні, а нижні половинки покриті чотирма смуговими фільтрами для роботи в спектральних каналах [36].

В додатку А наведена порівняльна таблиця з основними характеристиками сканерів надвисокого просторового розділення.

1.3 Інфрачервоні оптико-електронні системи спостереження космічного базування

На відміну від багатоспектральних сканерів видимого діапазону кількість запущених і сканерів, що розробляються, інфрачервоного діапазону набагато менше, хоча в останні роки інтерес до зондування земної поверхні в цьому діапазоні різко зріс.

Інформація, отримана від інфрачервоних (ІЧ) систем спостереження космічного базування, застосовуються в наступних галузях науки, техніки і господарствах:

- 1) Геологія й розвідка:
 - пошук корисних копалин і енергоносіїв;
 - оцінка стану приповерхневих порід.
- 2) Землекористування:
 - аналіз урбанізованих і промислових територій.
- 3) Екосистема й лісове господарство:

- оцінка екологічного стану;
- класифікація і оцінка запасів лісів.

4) Моніторинг надзвичайних ситуацій:

- спостереження за лісовими пожежами;
- спостереження за вулканами;
- спостереження за забрудненням нафтопродуктами;
- прогнозування природних і техногенних катастроф;
- оцінка зон лиха і збитків.

5) Моніторинг узбережжя і водних ресурсів:

- визначення температури морів;
- вивчення океанських ресурсів;
- визначення забруднень і їх джерел.

6) Метеорологія:

- визначення температури земної поверхні і хмар;
- спостереження хмарного покриву;
- аналіз і прогнозування кліматичних змін.

7) Сільське господарство:

- оцінка стану ґрунтів і розвиток агроресурсів.

Серед найбільш відомих космічних сканерів ІЧ-діапазону можна виділити: 1) німецький супутник “Bird” [37] зі сканером видимого і близького ІЧ-діапазону “WAOSS-B” і двоканальним сканером середнього й теплового ІЧ діапазонів; 2) канадсько-японський супутник “Terra” зі спектрорадіометром середнього просторового розрізнення “MODIS” [38] і радіометром далекого ІЧ-діапазону “ASTER” [39]; 3) американський супутник “Landsat-7” [40,41] із багатоспектральним сканером “ETM+”; 4) російські метеорологічні супутники “Meteor-M” і “Electro” із багатоспектральними камерами низького просторового розділення “MSU-MR-05” і “MSU-GS” [42]; 5) американський супутник “NOAA” із багатоспектральним сканером “AVHRR” [43]; 6) американо-аргентинський

супутник “SAC-D” із ІЧ-канером “NIRST” [44–47]; 7) японський супутник “MOS-1” з ІЧ-радіометром “VTIR” [48]; 8) китайсько-бразильський проект «CBERS» із багатоспектральним ІЧ-сканером “IR-MSS” [48]; 9) китайський метеорологічний супутник “FY”; 10) японський супутник “ALOS-3” із тепловізійною камерою “CIRC”.

22 жовтня 2001 р. було запущено мікросупутник Bi-spectral Infrared Detection (BIRD) із двома приладами корисного навантаження: 1) двоканальним інфрачервоним сканером Hot Spot Recognition Sensor system (HSRS); 2) ширококутним двоспектральним сканером видимого і близького ІЧ діапазону Wide-Angle Optoelectronic Stereo Scanner (WAOSS-B). Супутник був запущений на низьку кругову сонячно-синхронну орбіту висотою 572 км. Сканер “HSRS” сконструйований і виготовлений фірмою “Jenaoptronic” і призначений для спостереження за лісовими пожежами. Обрані спектральні діапазони пояснюються сигнатурою рослинного вогню. Найбільша різниця у випромінюванні між об’єктом спостереження і фоном припадає на спектральний діапазон середнього ІЧ діапазону (3,4...4,2 мкм) і на далекий (тепловий) ІЧ діапазон (8,5...9,3 мкм.)

Основні характеристики об’єктивів сканера середнього і дальнього ІЧ-діапазону:

- 1) фокусна відстань $f' = 46,39$ мм;
- 2) діаметр входної зіниці $\varnothing = 23,2$ мм;
- 3) відносний отвір 1:2;
- 4) поле зору $2\omega = 19^\circ$;
- 5) величина проекції пікселя $P = 370$ м;
- 6) крок зчитування рядків – 185 м;
- 7) смуга захвату $L = 190$ км;
- 8) приймач випромінювання – ПЗЗ-лінійки: CdHgTe, 2 лінійки, зміщених одна відносно іншої на половину пікселя по 512 елементів кожна, розмір пікселя 30×30 мкм;

9) охолодження лінійок – система Stirling до $80\div 100$ K;

10) радіометричне розділення – 14 біт.

Особливістю системи є спільний аналіз середнього й далекого ІЧ-діапазонів. Це пояснюється тим, що відкритий вогонь із температурою вище 500°C краще видно в середньому ІЧ діапазоні, а в далекому ІЧ діапазоні краще спостерігати схований вогонь і тління з температурою нижче 300°C .

“Terra” – багатонаціональний і багатофункціональний проект, що є результатом партнерства космічних агентств Канади і Японії під керівництвом NASA. Terra – важлива частина проектів NASA, що допомагають людству краще дізнатися про планету Земля. Проект Terra одночасно дозволяє вивчати хмари, зміст водяних пар, аерозолів і незначних газових домішок в атмосфері, земну та океанічну поверхні, взаємодію їх між собою та вплив на атмосферу й клімат.

На своєму борті “Terra” містить дві системи спостереження за Землею в тепловізійному спектральному діапазоні: Спектрорадіометр середнього просторового розрізнення (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS) і вдосконалений радіометр далекого ІЧ діапазону (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer instrument – ASTER).

Супутник “Terra” (EOS AM-1) запусканий на кругову близькополярну сонячно-синхронну орбіту висотою 705 км 18 грудня 1999 р.

Спектрорадіометр середнього просторового розділення (MODIS) дозволяє відслідковувати процеси, що відбуваються в атмосфері, на земній і океанічній поверхнях. Система дозволяє визначати температуру підстилаючої поверхні Землі й океану, псевдо кольорове фарбування акваторії океану, відслідковувати рослинний світ, характеристики хмарності і сніжного покриву, визначати температуру і вологість атмосфери. MODIS дозволяє отримати просторове розділення від 250 до 1000 м зі смугою захвату 2330 км. Сканер має 36 спектральних діапазонів, що працюють у

спектральному діапазоні 0,4...14,4 мкм для вирішення поставленого завдання.

У якості телескопа використовується дводзеркальний позаосьовий афокальний телескоп Грегорі діаметром 178 мм із внутрішньою польовою діафрагмою, який направляє випромінювання на чотири лінзові об'єктиви, по одному для кожного з видимого, близького ІЧ, середнього ІЧ і далекого ІЧ діапазонів, за допомогою трьох діхроїчних світлоподільних пластин. Телескоп зі збільшенням $4\times$ складається із двох позаосьових конфокальних параболічних дзеркал, що забезпечують широке поле зору. Для видимого спектрального каналу використовується трилінзовий об'єктив. Для близького ІЧ-діапазону також використовується трилінзовий об'єктив. Об'єктив для середнього ІЧ-діапазону складається з п'яти лінз із селеніду цинку і внутрішнього фільтра для усунення відбитих від поверхонь об'єктива променів. Об'єктив для далекого ІЧ-діапазону складається з п'яти лінз, виготовлених з кадмію телуру, селеніду цинку і германію. Для одержання широкої смуги захвату використовується скануюче дзеркало, яке дозволяє сканувати промені в межах $\pm 55^\circ$. Пасивний холодильний радіатор забезпечує охолодження двох фокальних площин з HgCdTe-приймачами для 20 інфрачервоних спектральних каналів до температури 83°K. Система має також чотири бортові калібратора: сонячний дифузор, чорне тіло, вузол спектрорадіометричного калібрування.

Багатоспектральний сканер і радіометр далекого ІЧ діапазону “ASTER” розроблено у Японії на фірмі JAROS (Japan Resources Observation System Organization) і складається із трьох підсистем: радіометра видимого й близького ІЧ-діапазонів (VNIR); радіометра короткохвильового ІЧ-діапазону (SWIR) і теплового інфрачервоного радіометра (TIR) [49]. VNIR має три спектральні канали з просторовим розділенням $P = 15$ м і смугою захвату $L = 60$ км. У якості об'єктива використовується дзеркальна оптична схема Шмідта із діаметром вхідної зіниці 82,5 мм і фокусною відстанню

$f' = 329$ мм. Поділ спектральних каналів відбувається за допомогою діхроїчних дзеркал і інтерференційних фільтрів. Кожна ПЗЗ-лінійка має 5000 пікселів розміром 7×7 мкм, хоча для побудови зображення використовуються тільки 4100 пікселів.

Підсистема SWIR має 6 спектральних каналів у діапазоні $\Delta\lambda = 1,6 \dots 2,43$ мкм із просторовим розрізненням $P = 30$ м і смугою захвату $L = 60$ км. У якості об'єктива використовується лінзовий об'єктив діаметром 190 мм і фокусною відстанню $f' = 387,75$ мм. Фокальна площина сформована шістьма ПЗЗ-лінійками на PtSi з 2048 пікселями і відстанню між пікселями 16,5 мкм, які конструктивно розміщені в одному корпусі. Відстань між сусідніми лінійками становить 1,33 мм. Спектральні канали формуються за допомогою інтерференційних фільтрів, нанесених на вхідне вікно фокальної площини. Лінійки охолоджуються до температури 80°K за допомогою циклічної системи Стірлінга.

Підсистема TIR формує 5 спектральних каналів у діапазоні $\Delta\lambda = 8,125 \dots 11,65$ мкм із просторовим розділенням $P = 90$ м і смугою захвату $L = 60$ км. Теплове зображення утворюється механічним скануванням десятьма HgCdTe детекторами для кожного спектрального діапазону. У якості об'єктива використовується дзеркальний об'єктив Ньютона з діаметром вхідної зіниці 240 мм, що складається з асферического головного дзеркала та лінзового коректора польових аберацій. Лінійки по 10 елементів для п'яти спектральних каналів розміщені в єдиному корпусі і охолоджуються гелієм до температури 80°K за допомогою системи Стірлінга. Інтерференційні фільтри, що формують спектральні діапазони, нанесені на вхідне вікно фокальної площини.

Космічна програма по розробці супутника дистанційного зондування “Landsat” під керівництвом NASA почалася ще в 1972 р. Перший супутник цієї серії “Landsat-1” було запущено в березні 1978 р. З тих пір було запущено сім супутників цієї серії. Супутник “Landsat-7” було запущено на

кругову сонячно-синхронну полярну орбіту висотою 705 км 15 квітня 1999 р. Проект Landsat спрямований на гарантоване одержання даних при спостереженні земної поверхні, границь прибережної зони й коралових рифів для одержання даних про стан навколишнього середовища.

Основним інструментом супутника є Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) – багатоспектральний сканер видимого, близького ІЧ, короткохвильового ІЧ і далекого ІЧ діапазонів, що має в цілому вісім спектральних каналів: 1) панхроматичний ($\Delta\lambda_1=0,52\ldots0,9$ мкм) із просторовим розділенням $P = 15$ м; 2) спектральні видимого, близького ІЧ і короткохвильового ІЧ діапазонів ($\Delta\lambda_2=0,45\ldots0,515$ мкм, $\Delta\lambda_3=0,525\ldots0,605$ мкм, $\Delta\lambda_4=0,63\ldots0,69$ мкм, $\Delta\lambda_5=0,75\ldots0,9$ мкм, $\Delta\lambda_6=0,1,55\ldots1,75$ мкм, $\Delta\lambda_7=2,09\ldots2,35$ мкм з просторовим розділенням $P = 30$ м; 3) тепловий канал з просторовим розділенням $P = 60$ м в діапазоні $\Delta\lambda_8=10,4\ldots12,5$ мкм. Ширина смуги захвату в усіх каналах становить $L=185$ км [40].

Оптична система сканера, що наведена на рис. 1.2 складається зі скануючого дзеркала на вході оптичної системи, головного двохдзеркального об'єктива Ритчи-Кретъена, який формує зображення в головній фокальній площині, дводзеркального коректора лінії сканування, який обертається разом зі скануючим дзеркалом, і дводзеркального проєкційного об'єктива, що передає зображення з головної фокальної площини в охолоджувану фокальну площину зі збільшенням $0,5\times$ [41]. ETM+ являє собою сканер з механічним скануванням типу Wisk-Broom, тому що в ньому застосовані короткі ПЗЗ-лінійки, що складаються із 16 пікселів розміром $0,104\times0,104$ мм для п'яти спектральних каналів, із 32 пікселів розміром $0,052\times0,052$ мм для панхроматичного каналу і із 6 пікселів для теплового каналу. Лінійки короткохвильового і далекого ІЧ-діапазонів охолоджуються за допомогою пасивного радіатора. Еквівалентна фокусна відстань оптичної системи (ОС) дорівнює $f' = 2438$ мм при діаметрі головного дзеркала 406 мм.

Супутник «Метеор-М» - серія російських метеорологічних супутників низького просторового розділення. Перший супутник цієї серії «Метеор-М №1» було запущено в 2007 р. на кругову сонячно-синхронну полярну орбіту висотою 830 км. Головним інструментом є багатоспектральний сканер “MSU-MR-05”, що має один канал видимого спектрального діапазону $\Delta\lambda_1 = 0,5 \dots 0,7$ мкм, один канал близького ІЧ-діапазону $\Delta\lambda_2 = 0,7 \dots 1,1$ мкм, канал короткохвильового ІЧ діапазону $\Delta\lambda_3 = 1,6 \dots 1,8$ мкм, канал середнього ІЧ діапазону $\Delta\lambda_4 = 3,5 \dots 4,1$ мкм і два канали далекого ІЧ діапазону $\Delta\lambda_5 = 10,5 \dots 11,5$ мкм і $\Delta\lambda_6 = 11,5 \dots 12,5$ мкм. Сканер має просторове розділення $P = 1$ км і смугу захвату $L = 3000$ км [42].

Супутник “Electro” – ще одна серія російських метеорологічних супутників низького просторового розділення, які працюють на геостаціонарній орбіті висотою 35600 км. Завдання цих супутників - регулярне (кожні 0,5 години) одержання знімків хмарності та підстильної поверхні Землі. У якості апаратури спостереження використовується багатозональний скануючий пристрій MSU-GS [42], що має 10 спектральних каналів: два видимого діапазону $\Delta\lambda_1 = 0,5 \dots 0,65$ мкм і $\Delta\lambda_2 = 0,65 \dots 0,8$ мкм; канал близького ІЧ діапазону $\Delta\lambda_3 = 0,8 \dots 0,9$ мкм; два канали середнього ІЧ діапазону $\Delta\lambda_4 = 3,5 \dots 4,0$ мкм і $\Delta\lambda_5 = 5,7 \dots 7,0$ мкм; п'ять каналів далекого ІЧ діапазону $\Delta\lambda_6 = 7,5 \dots 8,5$ мкм, $\Delta\lambda_7 = 8,2 \dots 9,2$ мкм, $\Delta\lambda_8 = 9,2 \dots 10,2$ мкм, $\Delta\lambda_9 = 10,2 \dots 11,2$ мкм і $\Delta\lambda_{10} = 11,2 \dots 12,5$ мкм. Сканер MSU-GS будує знімки розміром $20^\circ \times 20^\circ$ з просторовим розрізненням $P = 1$ км у видимому діапазоні і $P = 4$ км в ІЧ діапазонах. Відношення сигнал/шум для каналів видимого діапазону $SNR \geq 100$ і $NEDT(\Delta\lambda_4) = 0,8^\circ\text{K}$, $NEDT(\Delta\lambda_5) = 0,4^\circ\text{K}$ і $NEDT = 0,1 \dots 0,2^\circ\text{K}$ для каналів далекого ІЧ діапазону. Вага ОЕС MSU-GS становить 88 кг.

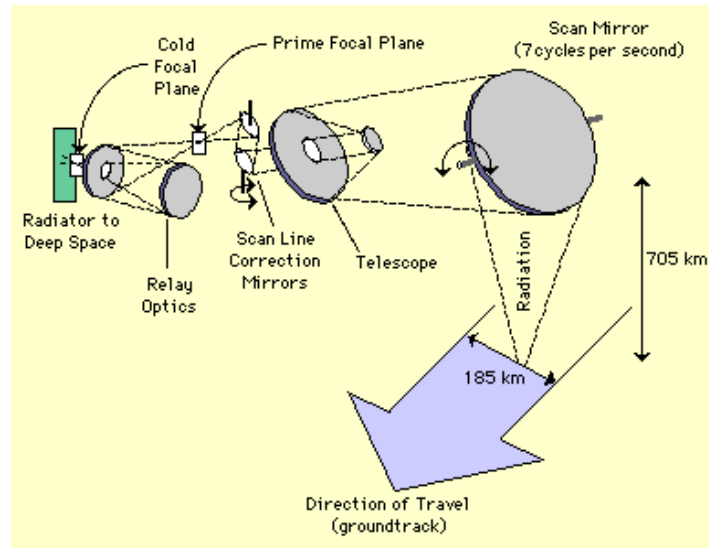


Рис. 1.2. Оптична схема сканера ETM+ [42]

Метеорологічні супутники NOAA-16, NOAA-17 і NOAA-18 використовують удосконалений радіометр дуже високого просторового розділення (Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR), ідентичний тому, який установлений на супутнику METEOR-A. Вони літають на сонячно- синхронній орбіті висотою 849 км із періодом обертання 102 хвилини. Сканер останньої версії «AVHRR/3» має шість спектральних каналів $\Delta\lambda_1=0,58...0,68$ мкм, $\Delta\lambda_2=0,725...1,0$ мкм, $\Delta\lambda_{3A}=3,55...3,93$ мкм, $\Delta\lambda_{3B}=1,58...1,64$ мкм, $\Delta\lambda_4=10,3...11,3$ мкм і $\Delta\lambda_5=11,4...12,4$ мкм, із просторовим розділенням $P=1100$ м і смугою огляду 3000 км [43]. Перший канал призначений для складання карти хмар і земної поверхні в денний час, другий канал – для контролю границь узбережжя, канал 3А – для виявлення снігу й льоду, канали 3В і 4 – для складання карт хмарності в нічний час і визначення температури поверхні морів, а п'ятий канал – для визначення температури поверхні морів. Вага приладу 22 кг, габарити $292 \times 366 \times 798$ мм³.

Супутник SAC-D (AQUARIUS) – спільний проект США й Аргентини. Сканер NIRST супутника SAC-D, розроблений Канадою й Аргентиною, первісно був призначений для виявлення високотемпературних об'єктів, таких як біомаса горіння і області вулканічної золи в ІЧ області спектра.

Сканер NIRST (New IR Sensor Technology) – інфрачервоний радіометр, що працює на неохолоджуваних болометричних фотоприймачах [44]. У його складі дві камери (MWIR і LWIR), кожна з яких використовує болометричну лінійку 512×3 пікселів. MWIR камера працює в спектральному діапазоні $\Delta\lambda_1 = 3,4 \dots 4,2$ мкм, а LWIR – у спектральних діапазонах $\Delta\lambda_2 = 10,4 \dots 11,3$ мкм і $\Delta\lambda_3 = 11,4 \dots 12,3$ мкм [45]. Канали обрані з урахуванням максимальної ефективності визначення вогню й вимірювання температури поверхні. З висоти орбіти 657 км вони мають просторове розділення $P = 351$ м і смугу захвату $L = 182$ км. Фокусна відстань лінзових германієвих об'єктивів для камер дорівнює $f' = 73$ мм при відносному отворі 1:1 і величині поля зору $2\omega = 15,6^\circ$. Лінії візування різних каналів рознесені друг від друга на 26 км.

Болометрична лінійка 512×3 розроблялася Канадським космічним агентством спеціально для цієї місії для сканера з “push-broom” скануванням (рис. 1.3). Канали $\Delta\lambda_2 = 10,4 \dots 11,3$ мкм і $\Delta\lambda_3 = 11,4 \dots 12,3$ мкм формуються інтерференційними фільтрами на захисному вікні матриці, а різниця температур, певних каналами, може бути використана для розпізнавання «крижаних» хмар і «водяних» хмар [46].

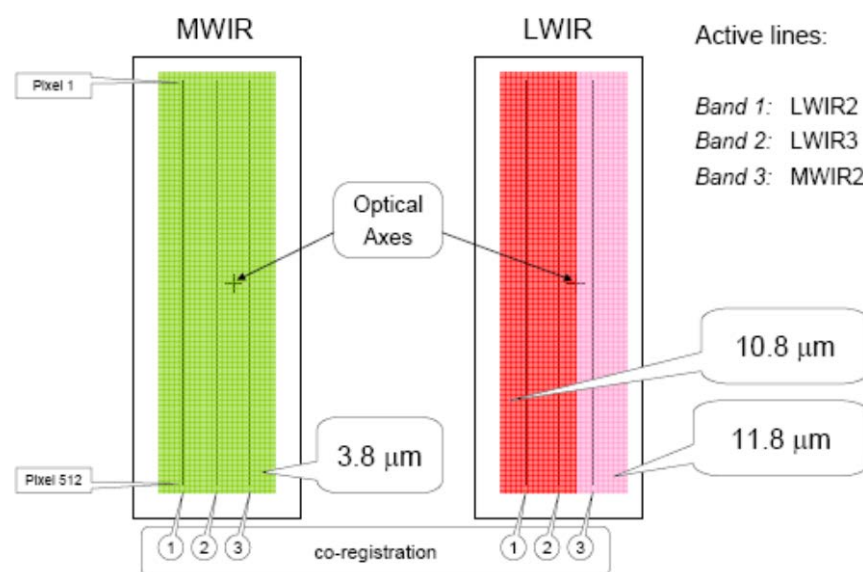


Рис. 1.3. Болометрична лінійка сканера NIRST [45]

Третя лінійка використовується як опорна для компенсації температурного дрейфу. Розмір пікселя становить 39 мкм, відстань між лініями в болометричній лінійці становить 2 мм. Час накопичення для величини проєкції пікселя 351 м становить 51 мсек. Час накопичення може мінятися від 7 до 140 мсек, що відповідає проєкції пікселя від 50 до 1000 м для типових кругових сонячно-синхронних орбіт.

Габарити приладу дорівнюють $350 \times 400 \times 500 \text{ мм}^3$.

Перший супутник MOS-1 був запущений Японією в лютому 1987 р., а в лютому 1990 році було запущено наступний супутник MOS-1b. Ці супутники містили три різні сканери: чотирьох каналний Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer (MESSR) і чотирьох каналний радіометр у видимій і ІЧ областях спектру – Visible and Thermal Infrared Radiometer (VTIR), та двох каналний Microwave Scanning Radiometer (MSR), що працює в мікрохвильовій області спектра [47]. Сканування здійснюється сканером VTIR механічним способом, обертанням дзеркала зліва на право щодо польоту супутника. Призначення цього приладу – спостереження за хмарністю та вимірювання температури океану. Він має один візуальний канал $\Delta\lambda_1=0,5 \dots 0,7 \text{ мкм}$ з просторовим розрізненням 900 м, один канал середнього ІЧ діапазону $\Delta\lambda_2=6,0 \dots 7,0 \text{ мкм}$ із просторовим розділенням $P = 2700 \text{ м}$ і два канали далекого ІЧ діапазону $\Delta\lambda_3=10,5 \dots 11,5 \text{ мкм}$ і $\Delta\lambda_4=11,5 \dots 12,5 \text{ мкм}$ із просторовим розділенням $P = 2700 \text{ м}$. Смуга захвату сканера становить $L = 1500 \text{ км}$ при висоті орбіти 9000 км. У якості об'єктива застосовується об'єктив Ритчи-Кретьєна.

Супутник CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) спільний китайсько-бразильський проєкт по створенню супутника дистанційного зондування. Супутник «CBERS-1» був запущений на сонячно-синхронну орбіту висотою 778 км 14 жовтня 1999 року, супутник «CBERS-2» - 21 жовтня 2003 року, а супутник «CBERS-2B» - 19 вересня 2007 року. На своєму борту супутники мають кілька приладів корисного навантаження:

1) Wide Field Imager (WFI) з просторовим розділенням 260 м і смугою огляду 885 км у двох спектральних діапазонах $\Delta\lambda_1=0,63\dots0,69$ мкм і $\Delta\lambda_2=0,770,89$ мкм; 2) High Resolution CCD Camera, яка забезпечує зйомку смуги шириною 113 км із просторовим розділенням 20 м у п'ятьох спектральних каналах видимого діапазону; 3) Infrared Multispectral Scanner (IR-MSS), що забезпечує просторове розділення 80 м і смугу захвату 120 км у панхроматичному $\Delta\lambda=0,5\dots1,1$ мкм і двох каналах середнього ІЧ діапазону ($\Delta\lambda=1,55\dots1,75$ мкм і $\Delta\lambda=2,08\dots2,35$ мкм), а також просторове розділення 160 м в одному каналі далекого ІЧ діапазону $\Delta\lambda=10,4\dots12,5$ мкм [48]. Об'єктив має фокусну відстань $f' = 500$ мм, діаметр вхідної зіниці 250 мм, поле зору $2\omega=8,8^\circ$.

Супутник FY – серія китайських метеорологічних супутників, частина яких працюють на полярній орбіті висотою від 850 до 900 км, а частина на геостаціонарній орбіті. Супутники FY-1A, FY-1B і FY-1C, FY-1D мають ідентичні скануючі пристрої, відповідно по 5 і 10 спектральних каналів. Супутники серії FY-2 оснащені трьох каналним скануючим радіометром. Сканування виконується механічним способом, обертанням похилого дзеркала.

В додатку Б наведена порівняльна таблиця з основними характеристиками інфрачервоних сканерів.

В розвитку та удосконаленні сучасних інфрачервоних систем спостереження чітко простежуються такі основні тенденції: мініатюризація; багатоспектральність; підвищення просторового розділення; багатоелементність; перехід на неохолоджувані мікроболометричні матриці [49].

1.4 Гіперспектральні системи дистанційного зондування Землі

В теперішній час гіперспектральні технології є актуальним сегментом розвитку оптико-електронних приладів. Застосування гіперспектрометрів для

завдань дистанційного зондування Землі забезпечує можливість одержання знімків високого як просторового, так і спектрального розділення [10].

Гіперспектральний прилад ДЗЗ збирає і обробляє інформацію в широкому діапазоні електромагнітного спектра. Особливості роботи гіперспектрометра дають можливість визначити властивості різних об'єктів, що перебувають на поверхні Землі, ґрунтуючись на спектральному складі відбитого від них випромінювання, що неможливо здійснити за допомогою мультиспектральних або панхроматичних каналів. Принциповою основою спектрального аналізу даних є відповідність відбитого електромагнітного випромінювання (інтенсивність, поляризація) оптичним властивостям поверхні, що відбиває. Так як кожний конкретний об'єкт характеризується певним спектральним складом випромінювання, використання гіперспектрометра забезпечує виявлення і детальне дослідження стану того або іншого об'єкта. Отримана інформація широко застосовна в різних сферах науки й промисловості.

В гіперспектрометрі кінцеве зображення надається у вигляді набору знімків однієї і тій самій ділянки поверхні Землі, сформованих різними вузькими спектральними каналами, кількість яких досягає від декількох сотень до тисяч. Ці знімки формують тривимірний гіперспектральний куб – масив даних, дві з координат якого відповідають просторовим координатам, а третя – номеру спектрального каналу (рис. 1.4).

Ефективність такого класу приладів визначається їх просторовим і спектральним розділенням. Гіперспектрометри класифікуються по ряду важливих параметрів і характеристик, зокрема, по способу здійснення спектрального розкладання випромінювання, в яких в якості диспергуючого елементу використовуються призми, дифракційні ґратки, інтерференційні фільтри [50–52].

Існує кілька основних способів сканування земної поверхні, які представлені на рис. 1.5 і в табл. 1.1. Найбільш часто формування

гіперспектрального зображення здійснюється шляхом сканування земної поверхні методом Pushbroom (одновимірне сканування) [53].

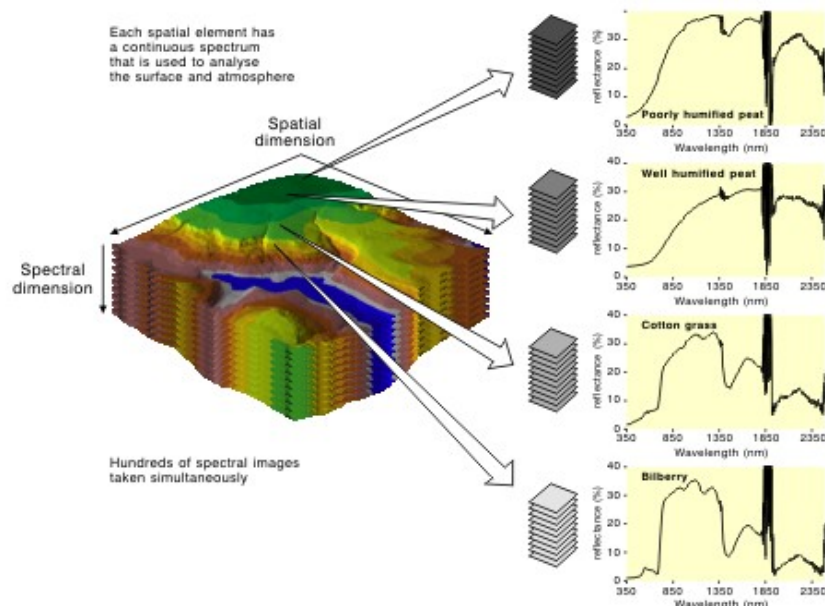


Рис. 1.4. Визначення типу і властивостей об'єктів по спектральному складу відбитого від них випромінювання, представленому у вигляді гіперспектрального куба [50]

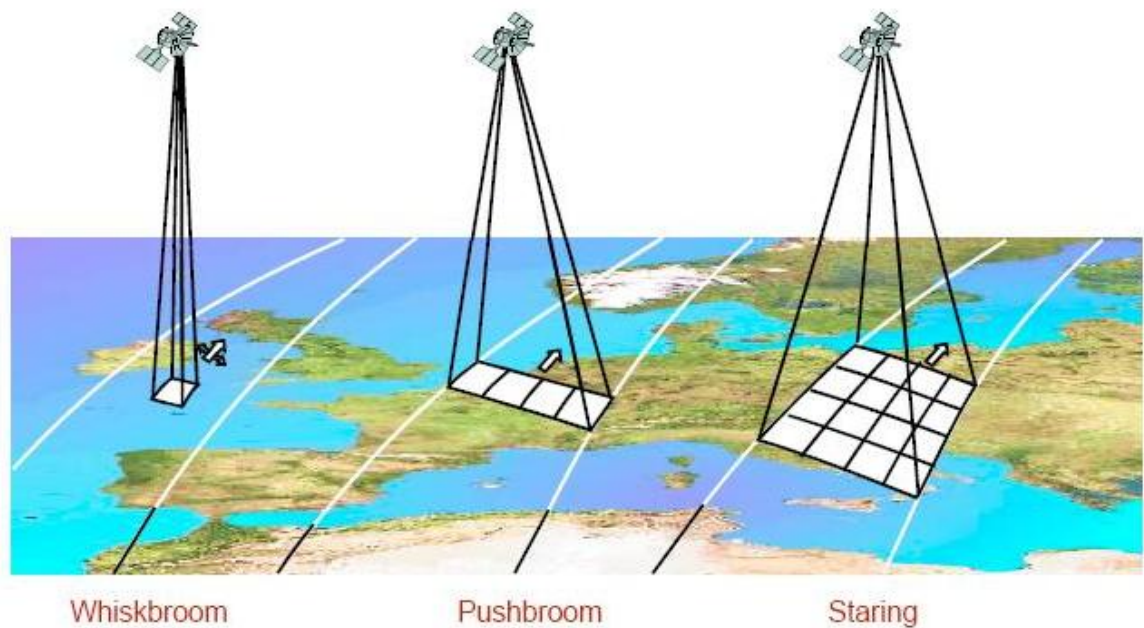


Рис. 1.5. Способи сканування земної поверхні [53]

На рис. 1.6 схематично зображено застосування різних методів одержання гіперспектрального зображення в системах типу Pushbroom. В табл. 1.2 наведені

переваги й недоліки різних методів одержання гіперспектрального зображення.

Існує цілий ряд різних гіперспектрометрів, які було розроблено, виготовлено та запущено на орбіту Землі та планет Сонячної системи.

Космічний гіперспектрометр високого спектрального розрізнення CHRIS розроблений у Великобританії й призначений для розв'язку завдань по дослідженню екологічного стану навколишнього середовища, змін підстильної поверхні, стану сільськогосподарських рослин [54]. Зокрема, для визначення вологості ґрунту, захворювань рослин, популяції тварин, для виявлення кошовних металів, для дослідження зон землетрусів і небезпечних природних явищ із метою їх запобігання.

Таблиця 1.1

Переваги й недоліки різних способів сканування

Спосіб	Переваги	Недоліки
Whiskbroom	Простота конструкції і юстування, широке поле зору	Наявність рухомих частин, необхідність додаткової обробки просторової інформації, малий час нагромадження
Pushbroom	Відсутність рухомих частин, можливість об'єднання спектральних зображень, тривалий час накопичення заряду для кожного пікселя.	Вузьке поле зору, складність юстування, складність оптичної системи, спектральна неоднорідність
Staring	Простота реалізації	Необхідність додаткової обробки просторової і спектральної інформації, складність забезпечення великої кількості спектральних каналів і високого просторового розділення

Технічні характеристики гіперспектрометра CHRIS, що дозволяють проводити якісні дослідження, наведені в табл. 1.3.

У гіперспектрометрі CHRIS використовуються два лінійні приймачі випромінювання, які здійснюють зйомку по методу pushbroom. Для поділу діапазону падаючого потоку випромінювання на діапазони VNIR і SWIR у фокальній площині оптичної системи розташовано дві щілини. Принципову схему приладу показано на рис. 1.7.

Гіперспектрометр CHRIS оснащений складною оптичною системою, що складається з об'єктива і двох каналів (VNIR, SWIR діапазонів) із призмовими диспергуючими елементами (рис. 1.8). Об'єктив виконаний за схемою Шафера і складається із п'яти сферичних поверхонь.

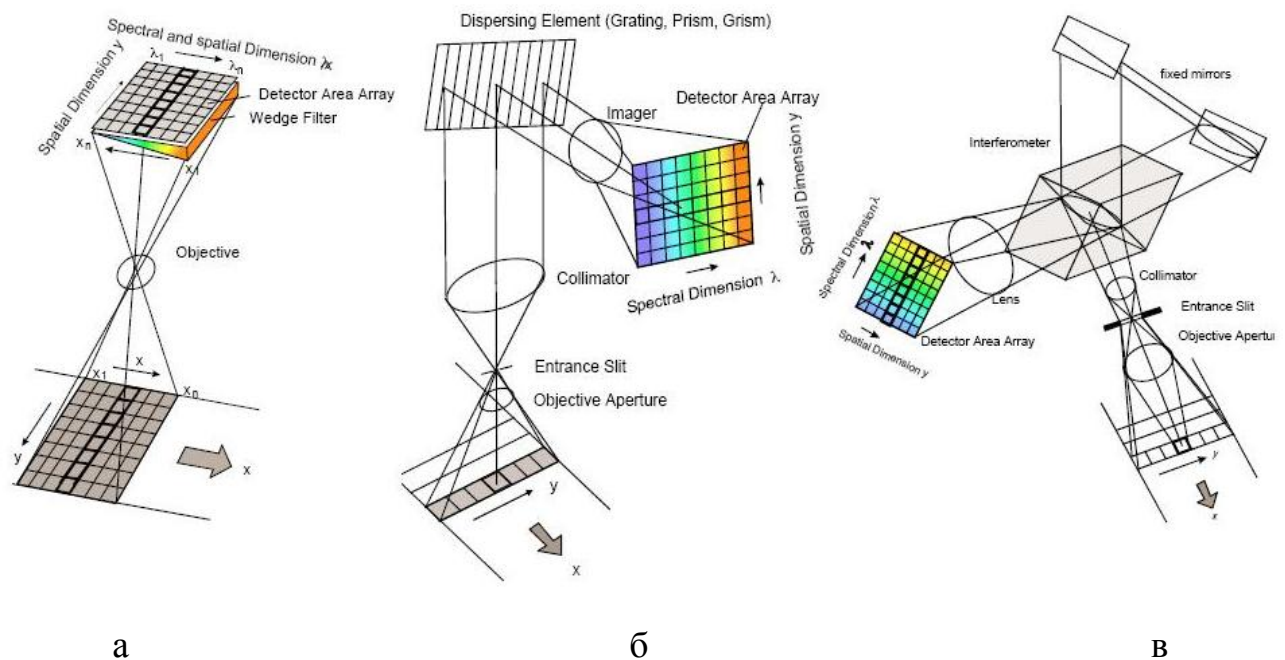


Рис. 1.6. Застосування різних методів одержання гіперспектрального зображення в системах типу Pushbroom [51]: а – інтерференційний фільтр; б – диспергуючий елемент (ґратка, призма); в – Фур'є спектрометр

Перед оптичною системою встановлене відхиляюче дзеркало, яке забезпечує можливість огляду поверхні в діапазоні $\pm 30^\circ$ в обох напрямках.

Тобто можливий огляд будь-якої ділянки Землі в межах ширини смуги ± 230 км.

Космічний апарат CHANDRAYAAN-1 є проектом Індійської організації космічних досліджень ISRO. Апарат складається з орбітального модуля і ударного зонда. Був виведений в 2008 році на місячну кругову полярну орбіту висотою близько 100 км за допомогою модернізованої версії індійської ракети-носія PSLV-XL. Основною метою розробки і запуску апарату CHANDRAYAAN-1 є дослідження хімічного і мінералогічного складу, а також топографічного характеру місячної поверхні, дослідження на предмет наявності летучих речовин на місяці, особливо, води в будь-якому стані (рідкому, кристалічному, газоподібному) [54].

Для виконання космічної місії використовується бортовий гіперспектрометр Nysі високого спектрального розділення, який працює у видимому і близькому інфрачервоному діапазонах довжин хвиль. Також використовується гіперспектрометр SIR-2, що працює в близькій інфрачервоній області спектра. Прилад SIR-2 призначений для виконання наступних завдань:

- Дослідження геологічних/мінералогічних і топографічних особливостей місячної поверхні.
- Вивчення вертикальних змін у складі верхнього шару місячної поверхні.
- Дослідження процесів утворення басейнів і кратерів.
- Вивчення метеорологічних умов на Місяці.
- Топографічна зйомка Місяця для визначення майбутніх посадкових майданчиків для посадки КА.

Технічні характеристики гіперспектрометрів Nysі і SIR-2 наведені в табл. 1.4 і 1.5 відповідно.

Переваги й недоліки різних методів одержання гіперспектрального зображення

	Ґратка	Призма	Призма- ґратка- призма	Фур'є- спектром.	Інтерферен- ційний фільтр
Спектральне розділення	високе	середнє	високе	високе	середнє
Ефективність дисперсії	середня	висока	висока	висока	висока
Спектральний діапазон	широкий (УФ - ІЧ)	вузький (УФ–бл. ІЧ)	широкий (вид. - ІЧ)	широкий (вид. - ІЧ)	широкий (вид. - ІЧ)
Чутливість до руху	немає	немає	так	немає	немає
Наявність рухомих частин	немає	немає	немає	так	немає
Одночасне одержання спектра	так	так	так	немає	немає
Одержання прямого пучка світла	середнє	низьке	високе	високе	високе
Складність виготовлення	низька	низька	середня	висока	низька
Габарити	малі	малі	великі	малі	великі

Гіперспектрометр CRISM, що працює у видимій і інфрачервоній області спектра, розроблений США (NASA) для дослідження поверхні Марса. Оптична схема цього приладу наведена на рис. 1.9.

Таблиця 1.3

Технічні характеристики гіперспектрометра CHRIS

Просторове розділення	25 м
Спектральний діапазон	0.43 – 2.4 мкм
Спектральне розділення	VNIR: 10 нм (0.43 – 1.0 мкм) SWIR: 20 нм (1.0 – 2.4 мкм)
Кількість спектральних каналів	128 (VNIR 64, SWIR 64)
Оптична система	$f = 600$ мм; $F/\# = 3$
Фотоприймач	VNIR: Si – ПЗЗ 256 пікселів SWIR: Insb – ПЗЗ 256 пікселів
Кут огляду	30°
Тип зйомки	pushbroom
Диспергуючий елемент	призма

Таблиця 1.4

Технічні характеристики гіперспектрометра Hysi

Просторове розділення	80 м
Спектральний діапазон	0.4 – 0.92 мкм
Спектральне розділення	VNIR: 15 нм
Кількість спектральних каналів	VNIR: 64
Фотоприймач	VNIR: 256 x 512 пікселів
Тип зйомки	pushbroom
Диспергуючий елемент	Інтерференційний фільтр у вигляді клину
Маса й габарити приладу	2.5 кг; 175x255x205 мм

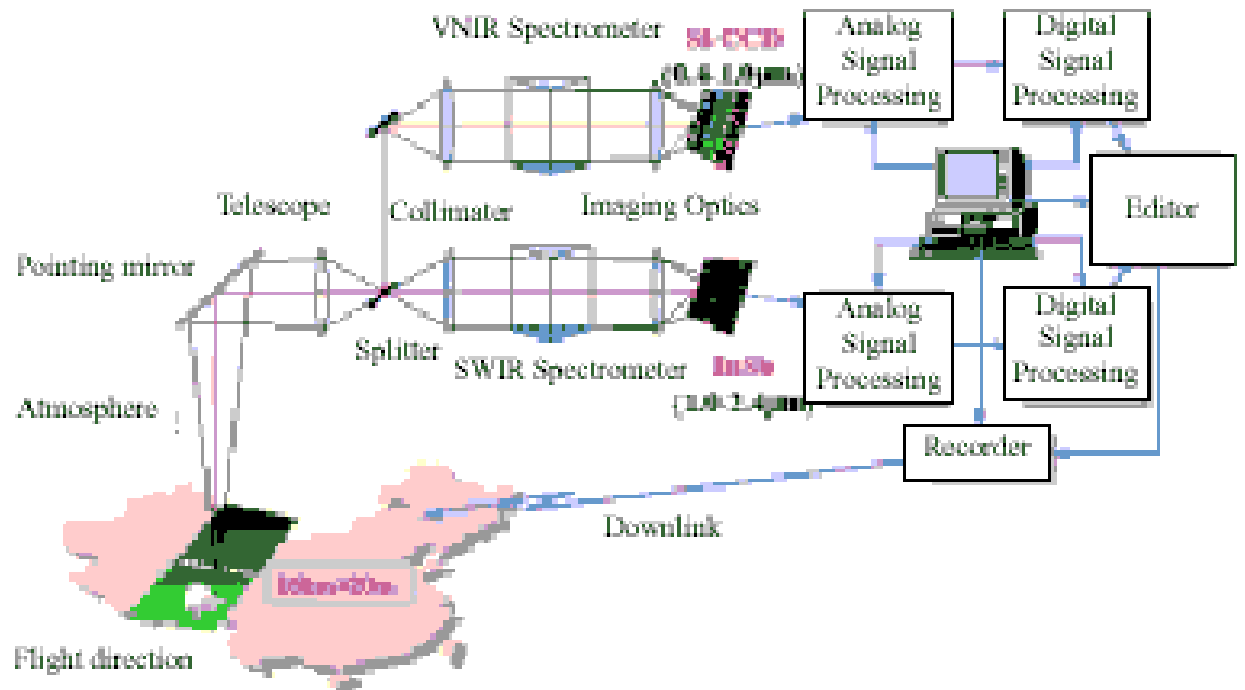


Рис. 1.7. Принципова схема гіперспектрометра CHRIS [53]

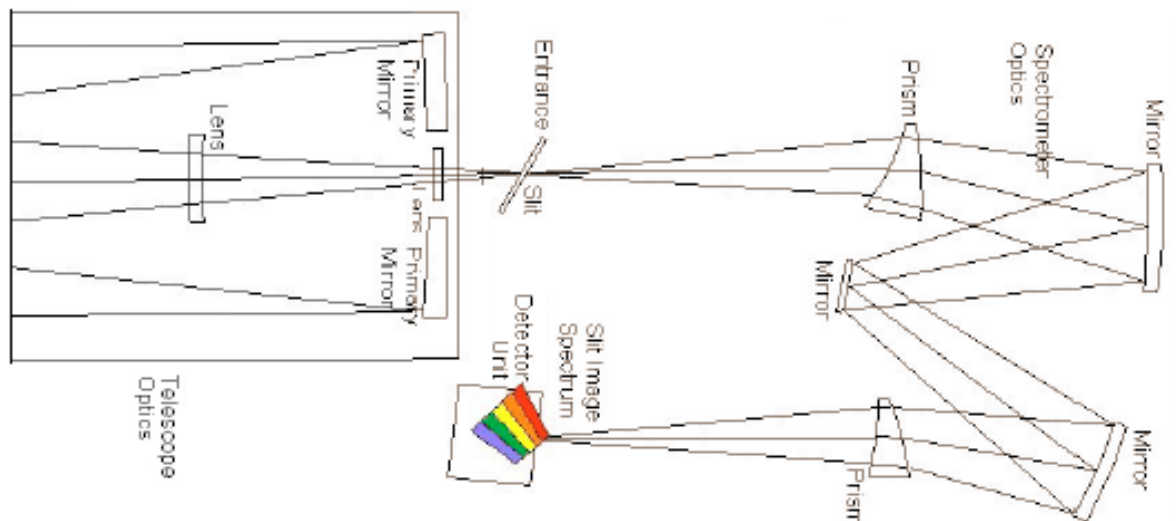


Рис. 1.8. Оптична схема гіперспектрометра CHRIS [53]

Таблиця 1.5

Технічні характеристики гіперспектрометра SIR-2

Спектральний діапазон	0.93 – 2.4 мкм
Спектральне розділення	NIR: 6 нм
Диспергуючий елемент	ґратки
Маса й габарити приладу	3.3 кг; 260x171x143 мм

Характеристики CRISM [55]:

- Маса – 32.92 кг.
- Споживана потужність при нормальній роботі – 44.4 - 47.3 Вт.
- Споживана потужність роботі у фоновому режимі – 16.1 Вт.
- Апертура – 100 мм.
- Фокусна відстань – 441 мм.
- Поле зору – 2.12°.
- Кутовий розмір пікселя – 61.5 мкрад.
- Спектральний діапазон роботи – VNIR (0.362 – 1.53 мкм);
IR (1.002 – 3.920 мкм).
- Спектральне розділення – 6.55 нм/канал.
- Просторове розділення - 15.7 – 19.7 м/піксель.

Німецький космічний гіперспектрометр Enmap працює у видимій ($\Delta\lambda=420\ldots1000$ нм) і ближній ІЧ-області спектра ($\Delta\lambda=900\ldots2450$ нм). Обидва каналу мають загальний ТМА об'єктив із двома щілинами у фокальній площині, по одній для кожного каналу. Особливістю спектрометрів обох каналів є дзеркально-призмова схема, що забезпечує високе світло пропускання з низкою поляризаційною чутливістю. Просторове розділення гіперспектрометра $P = 30$ м і смуга захвату 30 км [56]. На рис. 1.10 зображена оптична схема приладу.

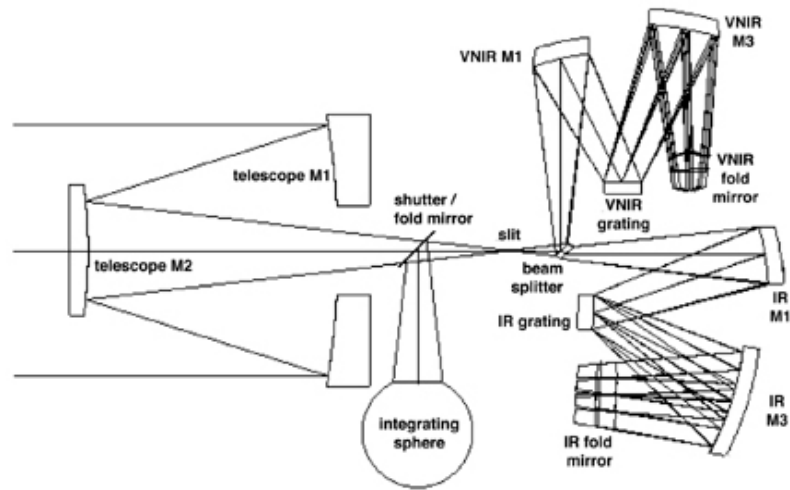


Рис. 1.9. Оптична схема гіперспектрометра CRISM [53]

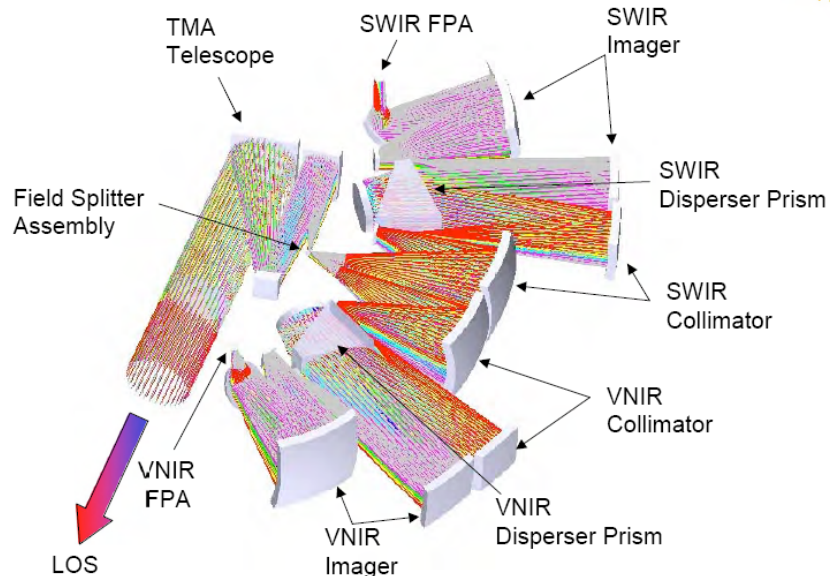


Рис. 1.10. Оптична схема гіперспектрометра Enmap [56]

1.5 Мета і задачі дослідження дисертаційної роботи на основі проведеного аналізу

Проведений аналіз сучасних оптико-електронних систем дистанційного зондування поверхні Землі та тенденцій їх розвитку свідчить про те, що головною проблемою при створенні таких систем є підвищення якості зображення, що досягається застосування ОЕС з високою просторовою роздільною здатністю, широким робочим спектральним діапазоном та високим спектральним розділенням.

Розглянуті основні характеристики систем спостереження високого та надвисокого просторового розділення, інфрачервоних систем спостереження та гіперспектральних систем дозволяють сформулювати мету та задачі дослідження представленої дисертації.

Метою дисертаційної роботи є вирішення наукової проблеми підвищення якості зображення в космічних оптико-електронних системах (ОЕС) дистанційного зондування Землі шляхом удосконалення методів проектування та контролю їх основних характеристик.

Мета досягається вирішенням наступних задач:

1. Для ОЕС спостереження високого та надвисокого просторового розділення.

1.1. Серед 11 розглянутих оптичних схем сканерів шість об'єтивів побудовані за схемою тридзеркального об'єктива Корша, три об'єктиви – за схемою дзеркально-лінзового об'єктива Рітчі-Кретена, один об'єктив – позаосьовий тридзеркальний анастигмат і один – лінзовий об'єктив.

1.2. Більшість сканерів мають панхроматичний канал і вузько спектральні канали (від 3 до 8 каналів).

1.3. В усіх сканерах застосовані ПЗЗ-лінійки з накопиченням сигналу від 8 до 96 раз.

1.4. Об'єктиви, що працюють із ПЗЗ-лінійкою з розміром пікселя 12-13 мкм мають діафрагмове число $F/14-19$, при розмірі пікселя 8-9 мкм – $F/8-12$, при розмірі пікселя 6 мкм – $F/6$.

1.5. Діаметр вхідної зіниці об'єктива повинен бути більшим за 500 мм, а фокусна відстань коливається залежно від розміру пікселя від 5000 мм до 13000 мм.

1.6. Більшість об'єтивів мають величину МПФ на частоті Найквіста більше 0,3.

1.7. Просторове розділення спектральних каналів, як правило, у чотири рази гірше, ніж у панхроматичному каналі. У більшості сканерів це

досягається збільшенням розміру пікселя і тільки в одному сканері – створенням меншої фокусної відстані для спектральних каналів.

1.8. Ширина смуги захвату коливається від 9,4 км до 55 км.

1.9. Таким чином, задачами для дисертації є:

1.9.1. Удосконалити і дослідити узагальнену фізико-математичну модель ОЕС космічних сканерів високого і надвисокого просторового розділення.

1.9.2. Розробити і дослідити абераційні моделі нових оптичних систем сканерів ДЗЗ високого та надвисокого просторового розділення.

2. Для інфрачервоних систем спостереження.

2.1. Сучасні космічні інфрачервоні системи спостереження мають певні особливості:

2.2. Більшість сканерів мають велике просторове розділення ($P \geq 1000$ м).

2.3. Перевагу віддають спектральному діапазону 10,5 – 14 мкм, так як в діапазоні 7,7 – 10,3 мкм відбувається поглинання випромінювання водяними парами і озоном, що призводить до похибок вимірювання температури земної поверхні.

2.4. Із розглянутих 12 сканерів 11 мають декілька робочих спектральних діапазонів.

2.5. Більшість ІЧ сканерів для формування зображення використовують оптико-механічне сканування і тільки в сканерах Bird і в NIRST використовується метод “push-broom” сканування ПЗЗ-лінійкою.

2.6. В усіх сканерах, крім NIRST, використовуються охолоджувані фотоприймачі, а сканері NIRST – неохолоджувана мікроболометрична лінійка.

2.7. Таким чином, задачею дисертації є:

2.7.1. Удосконалити і дослідити узагальнену фізико-математичну модель інфрачервоної системи спостереження космічного базування, що дасть можливість створити систему з кращим просторовим розділенням.

2.7.2. Розробити і дослідити абераційну модель інфрачервоного об'єктиву для експлуатації в широкому температурному діапазоні.

3. Для гіперспектральних систем.

3.1. Найбільш часто формування гіперспектрального зображення здійснюється шляхом сканування земної поверхні методом Pushbroom (одновимірне сканування) з використанням інтерференційних фільтрів, диспергуючих елементів (граток, призм) і зображуючих фур'є-спектрометрів.

3.2. Із розглянутих 23 гіперспектрометрів видимого і короткохвильового ІЧ-діапазону в 15 спектрометрів в якості диспергуючого елемента використовується дифракційна ґратка, в 4 – призма, в 2 – фур'є-спектрометри, в одному – інтерференційних світлофільтр.

3.3. Більшість гіперспектрометрів мають просторове розділення 30...70 м і спектральне розділення порядку 10 нм.

3.4. Таким чином, з метою покращення характеристик космічних гіперспектрометрів необхідно дослідити переваги та недоліки оптичних систем гіперспектрометрів, які використовують призми та дифракційні ґратки, а також зображувальних Фур'є –спектрометрів.

4. Для підтвердження результатів фізико-математичного моделювання необхідно:

4.1. Розробити методи вимірювання основних характеристик космічних оптико-електронних систем ДЗЗ, а саме геометричного і радіометричного калібрування, коефіцієнта розсіювання об'єктів, деформації дзеркал об'єктива.

4.2. Дослідити тепловізійну камеру космічного базування з мікроболометричною матрицею, а саме: мінімальну роздільну різницю температур (MRPT) камери з субпіксельним зміщенням зображень, MRPT камери при фазовому зміщенні тест-об'єкта.

4.3. Провести експериментальні дослідження розроблених методів проектування об'єктів для систем ДЗЗ з заданими властивостями з метою підтвердження теоретичних положень.

Висновки до розділу 1

Результати аналізу основних існуючих космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі, їх характеристик та тенденцій розвитку цих систем, що наведені в цьому розділі, дозволяють зробити такі висновки:

1. Сучасні ОЕС ДЗЗ доцільно класифікувати наступним чином:
 - 1.1. Системи спостереження високого та надвисокого просторового розділення.
 - 1.2. Інфрачервоні системи спостереження.
 - 1.3. Гіперспектральні системи дистанційного зондування Землі.
2. ОЕС ДЗЗ високого та надвисокого просторового розділення мають певні тенденції розвитку:
 - 2.1. Об'єкти систем використовують, в основному, дзеркальну схему Корша, або дзеркально-лінзову схему Рітчі-Кретєна.
 - 2.3. Об'єкти мають діаметр вхідної зіниці більшим за 500 мм, а фокусна відстань коливається залежно від розміру пікселя від 5000 мм до 13000 мм.
 - 2.4. Більшість сканерів мають панхроматичний канал і декілька вузько спектральні каналів.
 - 2.5. Ширина огляду земної поверхні коливається від 9,4 км до 55 км.
3. Сучасні космічні інфрачервоні системи спостереження мають певні особливості:
 - 3.1. Більшість сканерів мають велике просторове розділення ($P \geq 1000$ м).

3.2. Більшість ІЧ-сканерів для формування зображення використовують оптико-механічне сканування і тільки в сканерах Bird і в NIRST використовується метод “push-broom” сканування ПЗЗ-лінійкою.

3.3. В усіх сканерах, крім NIRST, використовуються охолоджувані фотоприймачі, а сканері NIRST – неохолоджувана мікроболометрична лінійка.

4. Одним із перспективних напрямків космічних досліджень поверхні Землі є використання гіперспектрометрів. Аналіз таких ОЕС ДЗЗ показав, що

4.1. Найбільш часто формування гіперспектрального зображення здійснюється шляхом сканування земної поверхні методом Pushbroom (одновимірне сканування) з використанням інтерференційних фільтрів, диспергуючих елементів (граток, призм) і зображуючих фур'є-спектрометрів.

4.2. Більшість гіперспектрометрів мають просторове розділення 30...70 м і спектральне розділення порядку 10 нм.

РОЗДІЛ 2

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ КОСМІЧНИХ СКАНЕРІВ ВИСОКОГО І НАДВИСОКОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗДІЛЕННЯ

Під час дослідження земної поверхні із космосу важливу роль відіграють ОЕС дистанційного зондування Землі. Одна з актуальних проблем, які стоять перед розробниками таких систем, – підвищення їх просторової та енергетичної роздільної здатності з одночасним зменшенням маси, розмірів та енергоспоживання. У цьому розділі розглянуто удосконалену узагальнену фізико-математичну модель ОЕС космічних сканерів високого і надвисокого просторового розділення. Дослідження такої моделі дозволить визначити такі оптимальні параметри об'єктива, як фокусна відстань, кутове і лінійне поле зору, діаметр вхідної зіниці і роздільну здатність [57,58]. Як приймач випромінювання (ПВ) у камері використовують ПЗЗ-лінійку з великим числом пікселів малих розмірів.

2.1 Формування зображення в сканерах космічного базування

Формування відеосигналу в ПЗЗ-камері зручно розглянути на узагальненій функціональній схемі ОЕСС [57]. Сонячне випромінювання, що відбивається від земної поверхні, на якій розміщений об'єкт спостереження, проходить через атмосферу і потрапляє в об'єктив камери. Об'єктив формує зображення об'єкта і фону у площині ПВ. Приймач випромінювання перетворює розподіл освітленості в електричний сигнал, який після зчитування формує відеосигнал.

Розглянемо детальніше окремі елементи цієї моделі.

Об'єкт спостереження розміщений на рівномірному фоні земної поверхні, яка характеризується альбедо ρ_b . Об'єкт має коефіцієнт відбиття ρ_t , який перевищує альбедо на величину $\Delta\rho$. Іноді величину $\Delta\rho$ визначають таким чином:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_b}. \quad (2.1)$$

Якщо об'єкт і фон мають поверхню, що відбиває сонячне випромінювання за законом Ламберта [57], а Сонце створює на поверхні Землі спектральну освітленість $E_{0\lambda}$, то яскравість об'єкта і фону в робочому спектральному діапазоні $\lambda_1 \dots \lambda_2$ дорівнюватиме

$$L_t = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_t(\lambda) E_{0\lambda}(\lambda) d\lambda; \quad L_b = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_b(\lambda) E_{0\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (2.2)$$

При цьому корисний сигнал формується за рахунок відмінності відбиваючої здатності поверхонь об'єкта і фону, тобто за рахунок абсолютного контрасту яскравості,

$$\Delta L_e = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\rho_t(\lambda) - \rho_b(\lambda)] E_{0\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (2.3)$$

Атмосфера змінює параметри випромінювання, яке поширюється від об'єкта і фону до ПЗЗ-камери, за рахунок поглинання і розсіювання. Атмосфера характеризується спектральним $\tau_A(\lambda)$ й інтегральним τ_A коефіцієнтами пропускання. Причому $\tau_A = E_0 / E_s$, де $E_s = 4,8 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² – інтегральна освітленість, що створюється Сонцем за атмосферою в робочому спектральному діапазоні; $E_0 = 2,4 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² – інтегральна освітленість поверхні Землі. Тому для попередніх розрахунків вважатимемо, що $\tau_A = 0,5$. Аналіз впливу атмосфери на роботу ПЗЗ-камери з урахуванням робочого спектрального діапазону $\lambda_1 \dots \lambda_2$, широти спостереження, висоти Сонця, часу доби і року, хмарності і стану атмосфери потребує додаткових досліджень.

Оптична система складається, як правило, із трьох основних елементів: головного об'єктива, пристрою формування спектральних каналів і плоского дзеркала зміни осі візування (у деяких випадках дзеркало відсутнє).

Найважливіший елемент ПЗЗ-камери – *об'єктив*, який характеризується такими параметрами [57 – 60]:

- фокусною відстанню f'_o ;
- відносним отвором D_p / f'_o або ефективним діафрагмовим числом $k_{eff} = f'_o / D_p$, де D_p – діаметр вхідної зіниці;
- полем зору:
 - кутовим $2\omega_0$;
 - лінійним у просторі предметів (на поверхні Землі) $X \times Y$;
 - лінійним у просторі зображень (в площині ПВ) $X' \times Y'$;
- модуляційною передавальною функцією $M_o(v_x)$;
- робочим спектральним діапазоном з урахуванням відповідного каналу пристрою формування спектральних каналів $\lambda_1 \dots \lambda_2$;
- спектральним $\tau_o(\lambda)$ й інтегральним τ_o коефіцієнтами пропускання відповідного спектрального каналу.

Об'єктив формує зображення об'єкта і фону у площині ПВ з контрастом освітленості

$$\Delta E' = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f'_o} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) E_{0\lambda}(\lambda) [\rho_t(\lambda) - \rho_b(\lambda)] d\lambda. \quad (2.4)$$

Якість зображення, що формує об'єктив, найповніше характеризується МПФ, яку для високоякісних об'єктивів зручно апроксимувати лінійною одновимірною лінійною функцією [57]

$$M_o(v_x) = 1 - 1,22 k_{eff} \lambda v_x. \quad (2.5)$$

Приймачем випромінювання служить ПЗЗ-лінійка, яка має такі характеристики, що будуть використаними під час проектування камери:

- тактову частоту зчитування f_d ;
- експозицію, еквівалентну середньому квадратичному значенню шуму, H_n ;

- експозицію насичення H_m ;
- розмір пікселя $V_D \times W_D$;
- відстань між центрами пікселів Δl_D ;
- кількість пікселів N_D ;
- чутливість R_D .

Через те, що чутлива площадка ПВ має кінцеві розміри $V_D \times W_D$, а сам приймач має постійну часу t_D , то його МПФ описують формулою [57,61]

$$M_D = M_{Ds} M_{Dt}, \quad (2.6)$$

де $M_{Ds}(v'_x) = \text{sinc}(V_D v'_x)$ – просторова МПФ; $M_{Dt} \approx 1$ – часова МПФ.

Урахування функції M_{Dt} потребує більш детальних досліджень і виходить за рамки цього підрозділу. Тому будемо вважати, що

$$M_D(v'_x) = \frac{\sin(\pi V_D v'_x)}{\pi V_D v'_x}. \quad (2.7)$$

У порівнянні зі сканерами середнього й низького просторового розрізнення робота сканера ДЗЗ високої просторової розрізненості має ряд особливостей. По-перше, для одержання достатнього радіометричного розділення необхідно використовувати лінійку з TDI (Time Delay Integration), по-друге, для збільшення смуги огляду й для одержання стерео знімків КА може відхилятися від надира на значні кути, що приведе до зміни проекції пікселя, а значить і до зміни просторового розділення.

2.2. Оптимізація параметрів сканера

Геометрично просторове розділення (величина проекції пікселя GSD) залежить від величини розміру пікселя ПЗЗ-лінійки V_D , величини фокусної відстані об'єктива f'_o і висоти орбіти h_f [57,62]

$$GSD = \frac{V_D h_f}{f'_o}. \quad (2.8)$$

Відповідно до цієї формули підвищення просторового розділення можна досягти за рахунок: 1) зменшенням розміру пікселя; 2) збільшенням фокусної відстані об'єктива; 3) зменшенням висоти орбіти.

Для одержання зображення на просторовій частоті, що відповідає частоті Найквіста $\nu'_N = 1 / 2V_D$, необхідно, щоб сумарна МПФ сканера на цій частоті була більше нуля. При коефіцієнті передачі контрасту (КПК) сканера $M_\Sigma(\nu_N) \approx 0,12$ розрахункова величина КПК об'єктива повинна бути не менш $M_o(\nu'_N) \geq 0,31$, а при КПК сканера $M_\Sigma(\nu'_N) \approx 0,08$ - $M_o(\nu'_N) \geq 0,2$.

Залежно від необхідного геометричного просторового розділення GSD, висоти орбіти h_f і необхідної величини КПК M_o об'єктив повинен мати певний діаметр вхідної апертури, яка зазвичай збігається з головним дзеркалом. Крім того, на величину контрасту впливає і величина центрального екранування K_{EKP} у дзеркально-лінзових і дзеркальних системах, величина якого становить порядку $K_{EKP} \approx 0,35$. На рис. ДВ,1 Додатку В наведена залежність необхідного діаметра головного дзеркала D_p залежно від величини проекції пікселя GSD для висоти орбіти $h_f = 668$ км при звичайно прийнятому контрасті об'єктива $M_o(\nu'_N) \geq 0,31(D_{p,opt})$, мінімально допустимому контрасті об'єктива $M_o(\nu'_N) \geq 0,2 (D_{p,min})$, $M_o(\nu'_N) \geq 0,47$, відповідного до дифракційного кружка розсіювання Ейрі, і $M_o(\nu'_N) = 0$, при яким об'єктив уже не розділяє об'єкти.

Була встановлена залежність діаметра світлової апертури (головного дзеркала телескопа) від заданого просторового розділення, висоти орбіти і спектрального діапазону оптичної системи [63]

$$D_{AD} = 0,5182 \left[1 + \left(2,2044 - K_{EKP}^{1,4} \right) M_o(\nu'_N) \right] \cdot \frac{h_f \cdot \lambda}{GSD}. \quad (2.9)$$

у діапазоні необхідних значень контрасту МПФ об'єктива на частоті Найквіста $0 \leq M_o(\nu'_N) \leq 0,25$ і величини коефіцієнта центрального екранування оптичної системи $0 \leq K_{EKP} \leq 0,5$.

В діапазоні необхідних значень контрасту об'єктива на частоті Найквіста $0,25 < M_o(\nu'_N) \leq 0,55$ і величини коефіцієнту центрального екранування оптичної системи $0 \leq K_{EKP} \leq 0,5$ діаметр апертурної діафрагми визначається залежністю

$$D_{AD} = 0,5182 \left[\begin{aligned} &(-389,3K_{EKP}^2 + 103,6K_{EKP} + 5,88)M_o^2(\nu_N) + \\ &+ (335,6K_{EKP}^2 - 76,5K_{EKP} - 0,88)M_o(\nu_N) + \\ &+ (-57K_{EKP}^2 + 11,5K_{EKP} + 1,42) \end{aligned} \right] \frac{h_f \lambda}{GSD} \quad (2.10)$$

Розмір пікселя V_D не впливає на величину діаметра світлової апертури, тому що для одержання потрібної величини геометричного просторового розділення при зменшенні розміру пікселя можна зменшити фокусну відстань об'єктива f'_o . Але при цьому для величини просторової частоти Найквіста і необхідної величини КПК об'єктива необхідна більша світлосила об'єктива, тобто той же діаметр, що і при застосуванні об'єктива з більшою фокусною відстанню і більшим розміром пікселя. На рис. ДВ,2 Додатку В наведена діаграма залежності діаметрів вхідної зіниці існуючих систем ДЗЗ від просторової роздільної здатності для різних КПК.

Для значень контрасту об'єктива на частоті Найквіста в діапазоні $0 \leq M_o(\nu'_N) \leq 0,25$ діаметр дзеркала для необхідного просторового розділення мало змінюється при зміні величин коефіцієнтів центрального екранування оптичної системи в діапазоні $0 \leq K_{EKP} \leq 0,5$. При збільшенні вимог до величини контрасту об'єктива при $M_o(\nu'_N) > 0,25$ діаметр дзеркала зростає з збільшенням коефіцієнту екранування тим більше, чим більше необхідне значення КПК.

Другим обмеженням для підвищення просторового розділення є вага сканера, яка, в основному, визначається габаритами головного дзеркала, в другу чергу, довжиною його об'єктива, яка залежить від фокусної відстані. Залежність ваги головного дзеркала від повного діаметра, яке для дзеркала без полегшення і з полегшенням на 65% наведена на рис. ДВ,3 Додатку В. Як видно з графіків для сканера із просторовим розділенням $GSD = 1$ м можна застосувати полегшене дзеркало діаметром 315 мм і вагою близько 2,3 кг. Для досягнення просторового розділення $GSD = 0,7$ м необхідне дзеркало діаметром 450 мм і вагою 7,2 кг, тобто в 3,13 рази важче, а для одержання просторового розділення $GSD = 0,5$ м необхідне дзеркало діаметром 630 мм і вагою 21,3 кг. Це означає, що при підвищенні просторового розділення в 2 рази з $GSD = 1$ м до $GSD = 0,5$ м вага головного дзеркала збільшується в 9,3 рази. Вага всього сканера при цьому збільшиться в 8...9 раз.

На рис. ДВ,4 в Додатку В наведена діаграма ваги існуючих сканерів дистанційного зондування Землі з якої видно, що для одержання просторового розділення $GSD = 0,5$ м вага сканера складе не менш 400 кг, а для одержання просторового розрізнення $GSD = 0,7$ м вага сканера складе від 80 кг до 380 кг. Вага сканера з просторовим розрізненням $GSD = 1$ м при вазі оптичних деталей 5 кг повинна скласти не більш 45 кг.

Третім чинником для оптимізації параметрів сканеру є величина лінійного розділення на місцевості (LPM) LPM при різних діаметрах світлової апертури. При цьому для всіх варіантів величина часу накопичення сигналу або стадій TDI підбирається таким чином, щоб сигнал від об'єкту з альбедо $\rho_t = 0,8$ відповідав максимально можливому сигналу динамічного діапазону фотоприймача. На рис. ДВ,5 наведені криві залежності LPM від різниці альбедо між об'єктом та фоном для сканера з розділенням $GSD = 1$ м з різними діаметрами світлової апертури.

В якості критерію для порівняння якості зображення можна обрати відношення середнього значення ЛРМ $\left(\frac{\Delta\rho_2=0,4}{\Delta\rho_1=0,03} \right) LPM_{CP}$ в заданому діапазоні різниць альbedo між об'єктом та фоном $0,03 \leq \Delta\rho \leq 0,4$ до величини GSD (LPM_{CP} / GSD). Так як діаметр світлової апертури прямо пропорційно залежить від величини GSD , то по осі абсцис відложимо добуток діаметра дзеркала D_p (мм) на GSD (м) ($D_p \cdot GSD$). На рис. ДВ,6 Додатку В наведена залежність (LPM_{CP} / GSD) від ($D_p \cdot GSD$).

Зміна значення МПФ на частоті Найквіста для об'єктива з коефіцієнтом екранування $K_{EKP} = 0,35$ в залежності від ($D_p \cdot GSD$) наведено на рис. ДВ,7 Додатку В. З рисунка видно, що до значення $M_o(\nu'_N) = 0,25$ МПФ росте дуже швидко з збільшенням значення ($D_p \cdot GSD$). Після цього при значному збільшенню вхідної апертури збільшення МПФ іде дуже повільно.

Таким чином, згідно до запропонованого критерію оптимальним діаметром вхідної апертури слід вважати $320 \leq (D_p \cdot GSD) \leq 370$.

2.3 Модель формування зображення в сканері при відхиленні візирної осі від надиру

Одним з важливих показників космічної системи ДЗЗ є періодичність спостереження, яка, зазвичай, вимірюється часом між двома сусідніми зйомками заданого об'єкту спостереження. В загальному випадку періодичність спостереження залежить від багатьох факторів: параметрів орбіти супутника ДЗЗ; географічної широти, на якій розташовано об'єкт спостереження; смуги захвату; максимально можливих кутів відхилення візирної осі ОЕС від надиру [64].

На перших українських супутниках ДЗЗ з ОЕС низької та середньої просторової роздільної здатності, які мали широку смугу захвату

використовувалась зйомка поверхні Землі без перенацілювання. Оптична вісь сканера при такій зйомці направлена в надир, а направлення сканування визначається орбітальним рухом супутника [65].

Оптичні системи високої та надвисокої просторової роздільної здатності мають невеликі кути поля зору, а отже і невелику смугу захвату на поверхні Землі в межах від декількох кілометрів до декількох десятків кілометрів. При зйомці тільки в надир періодичність спостереження таких систем буде дуже малою, отже КА з ОЕС ДЗЗ високої та надвисокої просторової роздільної здатності для підвищення періодичності спостереження мають змогу міняти кутову орієнтацію по осям тангажу, крену та рискання.

Підвищення періодичності спостереження на різних витках польоту КА відбувається за рахунок нахилу по куту крену, а на одному витку – за рахунок нахилу по куту тангажу.

В випадку коли візирна вісь розташована вертикально по нормалі до поверхні Землі величина *геометричної проекції пікселя* на поверхні Землі визначається за формулою (2.8):

– в напрямку польоту

$$A = \frac{V_D h_f}{f'_o}; \quad (2.11)$$

– в напрямку перпендикулярному польоту

$$P = \frac{W_D h_f}{f'_o}. \quad (2.12)$$

При цьому шаг між центрами пікселів в зображенні на Землі (GSD – Ground Sampling Distance) в напрямку польоту дорівнює

$$A_x = \frac{V_{п.т.}}{f_l}, \quad (2.13)$$

де $V_{п.т.}$ - швидкість переміщення підсупутникової точки [66]; $V_D \times W_D$ – розмір пікселя ПЗЗ-лінійки; f_l – частота зчитування ПЗЗ-лінійки.

В напрямку перпендикулярному польоту КА величина геометричної проекції пікселя визначається за формулою (2.12).

При повороті КА відносно надиру на кути тангажу θ та крену ϕ візирна вісь сканера також повернеться на ці кути і перетинає поверхню Землі в точці O'' (рис. 2.1).

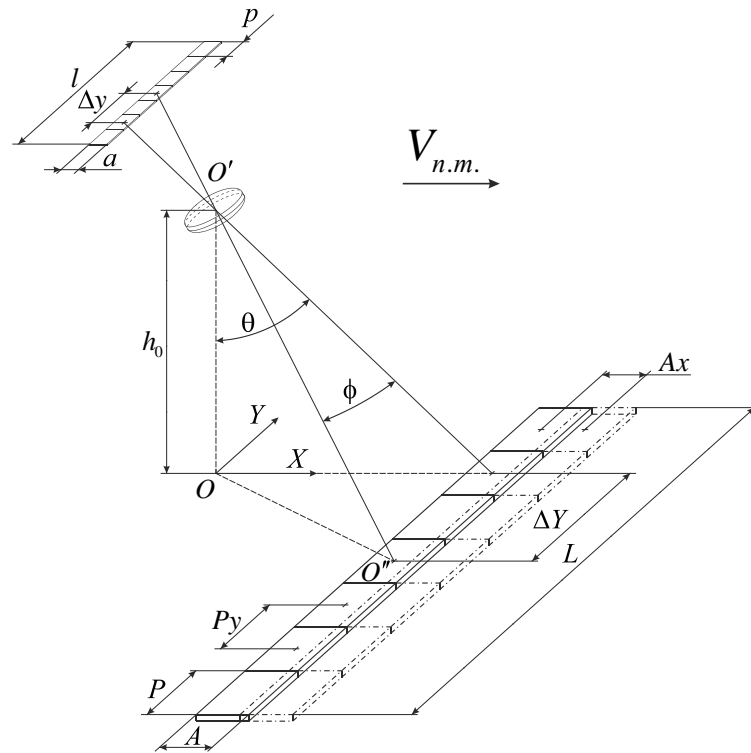


Рис. 2.1. Схема формування зображення в сканері високої роздільної здатності

Зміниться також і геометрія проекцій пікселів та їх розташування в Земній системі координат, що необхідно врахувати при проектуванні ОЕС ДЗЗ.

Кутова орієнтація КА в просторі здійснюється, або за рахунок приводів гіроскопічних махових коліс, або електромагнітними пристроями, які взаємодіють з магнітним полем Землі. Системи контролю орієнтації та управління видають кути в системі координат КА, тобто локальній системі координат (ЛСК). Можливі два варіанти розворотів в ЛСК: «тангаж-крен» та «крен-тангаж».

Була розглянута теорія кутового руху центральної візирної осі ОЕС, яка співпадає з оптичною віссю (рис. 2.2).

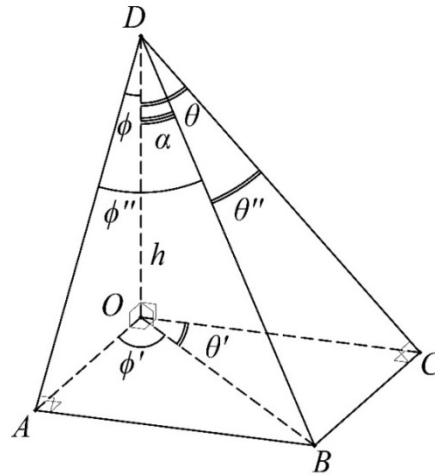


Рис. 2.2. Схема відхилення оптичної осі

КА знаходиться в точці D на висоті $h = OD$ від поверхні Землі (ПЗ) – площини $OABC$. При знаходженні центральної візирної осі в надирі вона переткне ПЗ в точці O . При розвороті КА по тангажу на кут θ візирна вісь займе положення DC і переткне ПЗ в точці C . При відхиленні КА по крену на кут ϕ візирна вісь займе положення DA і переткне ПЗ в точці A . При відхиленні водночас по двом осям візирна вісь займе положення DB і перетне ПЗ в точці B .

В якості ПВ в системах ДЗЗ високої та надвисокої роздільної здатності використовують ПЗЗ-лінійки з системою накопичення TDI, які по суті є матричними фотоприймачами. Вони забезпечують певне кутове поле зору в оптичній системі вздовж напрямку польоту КА та перпендикулярно напрямку польоту. Було розглянуто поетапний кутовий рух позаосьового візирного проміння, який проходить через центр позаосьового пікселя та головну точку об'єктива для відхилення в ЛСК при послідовності відхилення «тангаж-крен».

Моделювання руху центрів пікселів на поверхні Землі при розвороті в локальній системі координат при послідовності розворотів КА «тангаж-крен» показана на рис. 2.3.

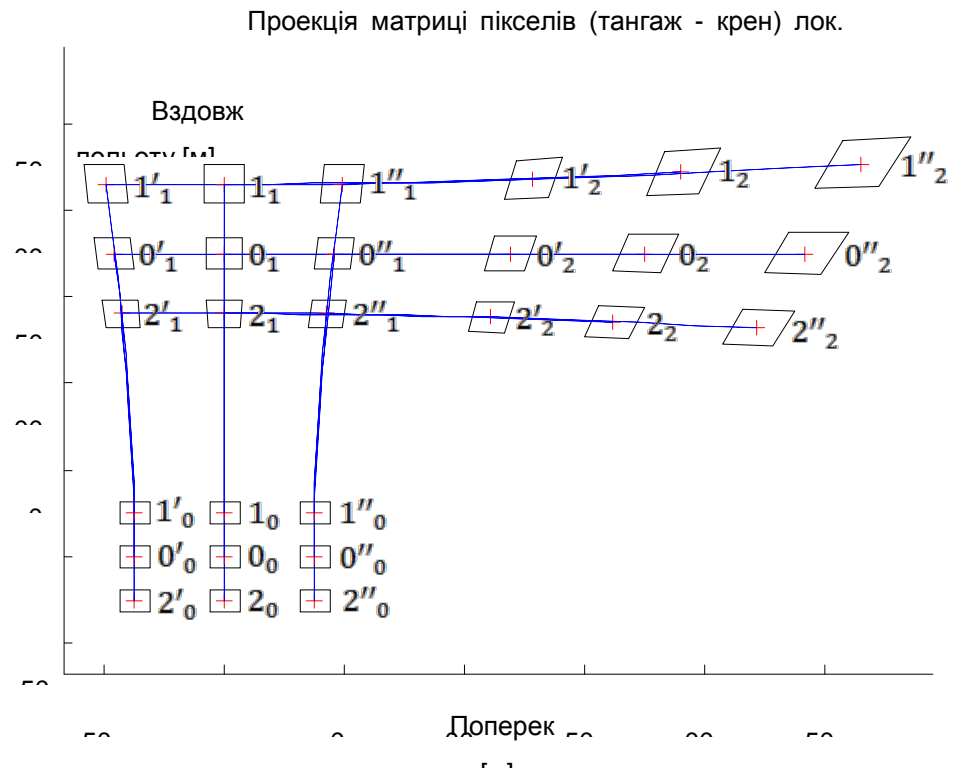


Рис. 2.3. Рух проекцій пікселів на ПЗ при розвороті КА в ЛСК при послідовності «тангаж-крен» [66]

На рис. 2.3 зображено рух проекцій дев'яти пікселів на поверхні Землі. Пікселі утворюють матрицю в фокальній площині об'єктива, де точки перетину площини поверхні Землі сформовані:

- ✓ 0_0 – центральною візирною віссю, що співпадає з оптичною віссю та надиром з кутовими координатами в системі координат оптичної системи $W_y=0, W_x=0$;
- ✓ $0'_0$ та $0''_0$ - боковими візирними осями, що лежать в площині оптичної осі та надиру та мають кутові координати $W_y \neq 0, W_x=0$;
- ✓ $1'_0, 1''_0$ та $2'_0, 2''_0$ - боковими візирними осями, що не лежать в площині оптичної осі та надиру та мають кутові координати $W_y \neq 0, W_x \neq 0$.

Індексом 1 позначені точки перетину ПЗ візирних осей при початковому розвороті КА по тангажу, а індексом 2 – при наступному розвороті по куту крену.

При розвороті по тангажу прямокутна матриця проекцій пікселів на ПЗ перетворюється в трапецію, а при подальшому розвороті по куту крену – в

спотворений чотирикутник. При розвороті по тангажу центральна колонка проекцій пікселів, що лежать в площині, яка проходить через оптичну вісь та вісь руху КА, не нахиляється по відношенню напрямку руху, а бокові колонки відхиляються в різні боки. Центральний, передній та задній рядки проекцій пікселів залишаються при цьому перпендикулярними напрямку руху. При подальшому розвороті КА по куту крену центральний рядок проекцій пікселів залишається перпендикулярним напрямку руху, а передній та задній рядки проекцій пікселів нахиляються в різні боки. Всі стовпчики проекцій пікселів нахиляються відносно напрямку польоту на різні кути.

Моделювання руху центрів пікселів на поверхні Землі дозволило отримати формулам для розрахунку координат пікселів ПЗЗ-лінійки при розвороті в локальній системі координат. Результати розрахунків при послідовності розворотів КА «крен-тангаж» наведені на рис. 2.4.

При послідовності розворотів «крен-тангаж» індексом 1 позначені точки перетину ПЗ візирних осей при початковому розвороті КА по крену, а індексом 2 – при наступному розвороті по куту тангажа.

При розвороті по крену прямокутна матриця проекцій пікселів на ПЗ перетворюється в трапецію, а при подальшому розвороті по куту тангажа – в спотворений чотирикутник. При розвороті по крену центральна колонка проекцій пікселів, що лежать в площині, яка проходить через оптичну вісь та вісь руху КА, не нахиляється по відношенню до напрямку руху КА, як і бокові колонки. Центральний рядок проекцій пікселів залишається при цьому перпендикулярним напрямку руху. Передній та задній рядки проекцій пікселів нахиляються в різні боки. При подальшому розвороті КА по куту тангажа центральний, передній та задній рядки проекцій пікселів нахиляються відносно напрямку польоту на різні кути. Центральний стовпчик проекцій пікселів співпадає з напрямком руху КА, а бокові стовпчики відхиляються в різні боки.

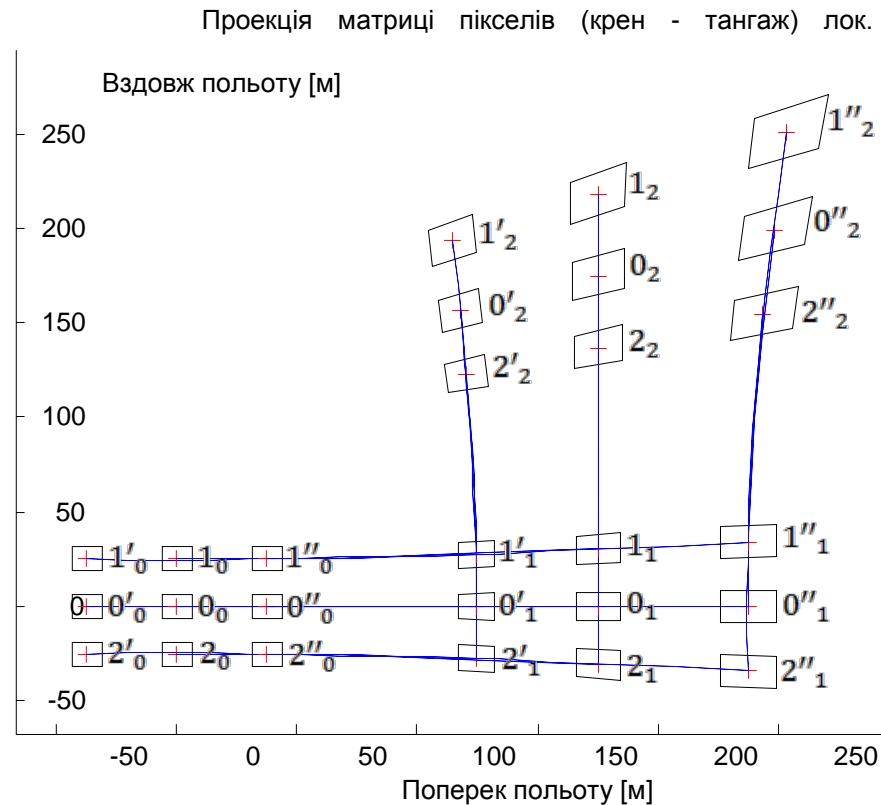


Рис. 2.4. Рух проекцій пікселів на ПЗ при розвороті КА в ЛСК при послідовності «крен-тангаж» [66]

При застосуванні в сканері ПЗЗ-лінійок з TDI накопиченням заряд з пікселя в піксель передається по стовпчику, тому дуже важливо, щоб напрям стовпчиків співпадав з напрямком руху при скануванні. З цієї точки зору послідовність розворотів КА «крен-тангаж» більше підходить для застосування в системах ДЗЗ високої та надвисокої роздільної здатності.

Крім зміни положення місця перетину візирної осі з ПЗ при відхиленні КА від надиру відбувається і зміна розміру та кроку (GSD) між центрами пікселів. Це приводить до погіршенню просторової роздільної здатності системи. Так як на просторову роздільну здатність більш впливає крок між центрами пікселів, то знаходження крайніх центрів пікселя від оптичної осі можна записати, як

$$\begin{pmatrix} L_{p0} \\ L_{q0} \end{pmatrix} = 0.5 \begin{pmatrix} V_D \\ W_D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 - p_D \\ 1 - q_D \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} dL_p \\ dL_q \end{pmatrix}, \quad (2.14)$$

де $V_D \times W_D$ крок (період) між центрами пікселів матриці вздовж осі Ox та Oy , або розмір пікселя без урахування коефіцієнта заповнення; розмір (формат) матриці ПВ $p_D \times q_D$; порядок нумерації пікселів в рядку та стовпчику $i = \overline{0, p_D - 1}$ та $j = \overline{0, q_D - 1}$; $dL_{p,q}$ – лінійне зміщення центра МПВ по відповідним осям координат.

Положення центру кожного пікселя можна розрахувати за формулою

$$\begin{pmatrix} L_{pi} \\ L_{qj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{p0} \\ L_{q0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_D \\ W_D \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

Кутове розташування центрів пікселів в системі координат сканера буде

$$\begin{pmatrix} W_{xi} \\ W_{yj} \end{pmatrix} = \arctg \left(\frac{1}{f'_0} \begin{pmatrix} L_{pi} \\ L_{qj} \end{pmatrix} \right). \quad (2.16)$$

Визначення просторового розрізнення схематично можна показати на геометричній схемі, що наведена на рис. 2.5.

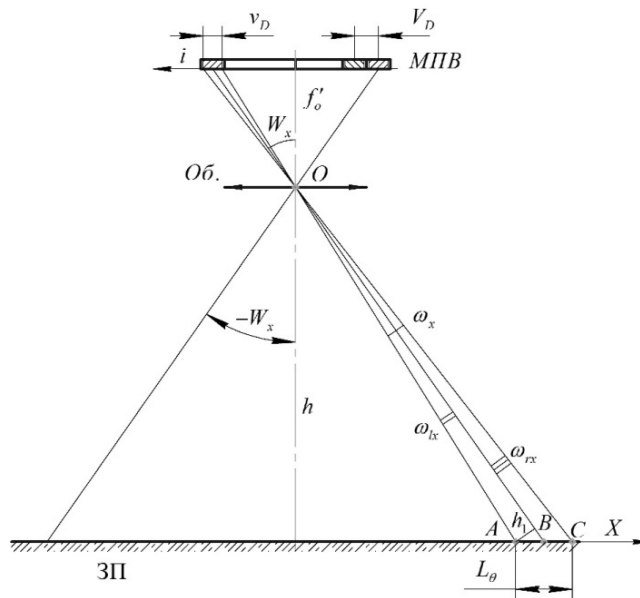


Рис. 2.5. Схема для визначення миттєвого поля зору пікселя [66]

Для розрахунку просторової роздільної здатності піксель умовно розділимо на 9 точок з рівним розташуванням $m_{x,y}$ (рис. 2.6).

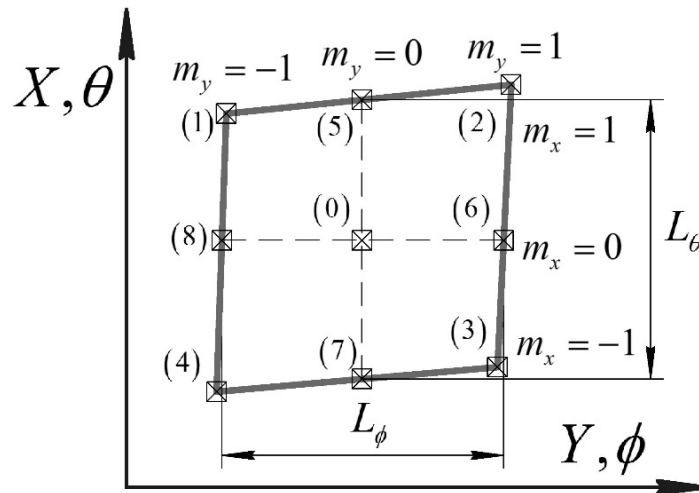


Рис. 2.6. Проекція пікселя на поверхні Землі [66]

Відповідно до рис. 2.6 просторове розділення L_θ вздовж осі Ox визначається точками {5, 7}, а L_ϕ вздовж осі Oy – {6, 8}. В залежності від порядку розворотів в ЛСК можна знайти кутові координати необхідних точок.

Знаючи кутові координати точок проєкцій пікселів можемо перейти до лінійних координат. Позначимо лінійні координати точок вздовж осі Ox – M_θ , а вздовж осі Oy – M_ϕ . В загальному кутові координати перераховуються в лінійні як:

$$\begin{pmatrix} M_\phi(m_x, m_y) \\ M_\theta(m_x, m_y) \end{pmatrix} = h \cdot \operatorname{tg} \begin{pmatrix} \phi_2(m_x, m_y) \\ \theta_2(m_x, m_y) \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

Просторове розділення або проєкція пікселя на ПЗ є відстанню між відповідними точками, яку можна знайти, як:

$$\begin{pmatrix} L_\theta \\ L_\phi \end{pmatrix} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} M_{\theta 5} \\ M_{\theta 6} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} M_{\theta 7} \\ M_{\theta 8} \end{pmatrix} \right)^2 + \left(\begin{pmatrix} M_{\phi 5} \\ M_{\phi 6} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} M_{\phi 7} \\ M_{\phi 8} \end{pmatrix} \right)^2}. \quad (2.18)$$

Запропонований метод розрахунку дозволяє точно розраховує величину проєкції пікселя при всіх кутах відхилення візирної осі від надиру.

Для експертної оцінки величини проєкції пікселя на ПЗ можна скористатися спрощеним методом розрахунку. В межах кутів відхилення візирної осі від надиру $\theta = \pm 35^\circ$ та $\phi = \pm 35^\circ$, які відповідають умові $\theta + \phi \leq 40^\circ$,

величина геометричної проекції пікселя на поверхні Землі достатньо точно описується формулами [67]:

- в напрямку польоту

$$L_{\theta} = \frac{V_D h_O}{f'_O \cos^2(\theta \pm \omega_x) \cos(\phi \pm \omega_y)}; \quad (2.19)$$

- в напрямку перпендикулярному польоту

$$L_{\phi} = \frac{W_D h_O}{f'_O \cos(\theta \pm \omega_x) \cos^2(\phi \pm \omega_y)}. \quad (2.20)$$

На рис. 2.7 наведено графіки залежності відносної похибки розрахунку величини геометричної проекції пікселя на ПЗ по полю зору в межах суми кутів відхилення по тангажу та крену $\theta + \phi$, що розраховані за точними формулами і наближеними формулами (2.19), (2.20).

Розрахунки були проведені для двох систем:

- для сканера високої роздільної здатності (криві 1 - L_{θ} , 3 - L_{ϕ}) з параметрами:
 - фокусна відстань $f'_O = 2258$ мм;
 - кутове поле зору $2\omega_x = 8^\circ$; $2\omega_y = 0,013^\circ$;
 - величина проекції пікселя в надирі $L_{\theta} = L_{\phi} = 2,37$ м;
- для сканера надвисокої роздільної здатності (крива 2 - L_{θ}) з параметрами:
 - фокусна відстань $f'_O = 6680$ мм;
 - кутове поле зору $2\omega_x = 1,65^\circ$; $2\omega_y = 0,009^\circ$;
 - величина проекції пікселя в надир $L_{\theta} = L_{\phi} = 0,7$ м.

З наведених графіків видно, що при розрахунку величини проекції пікселя вздовж напрямку польоту L_{θ} за формулою (2.19) величина похибки розрахунку при сумі кутів по тангажу та крену $\theta + \phi \leq 40^\circ$ не перевищує 1%, а для максимальної суми кутів $\theta + \phi = 70^\circ$, досягає 7,3%. При розрахунку величини проекції пікселя поперек напрямку польоту L_{ϕ} за формулою (2.20)

величина похибки розрахунку при сумі кутів по тангажу та крену $\theta + \phi \leq 70^\circ$ не перевищує 0,33%.

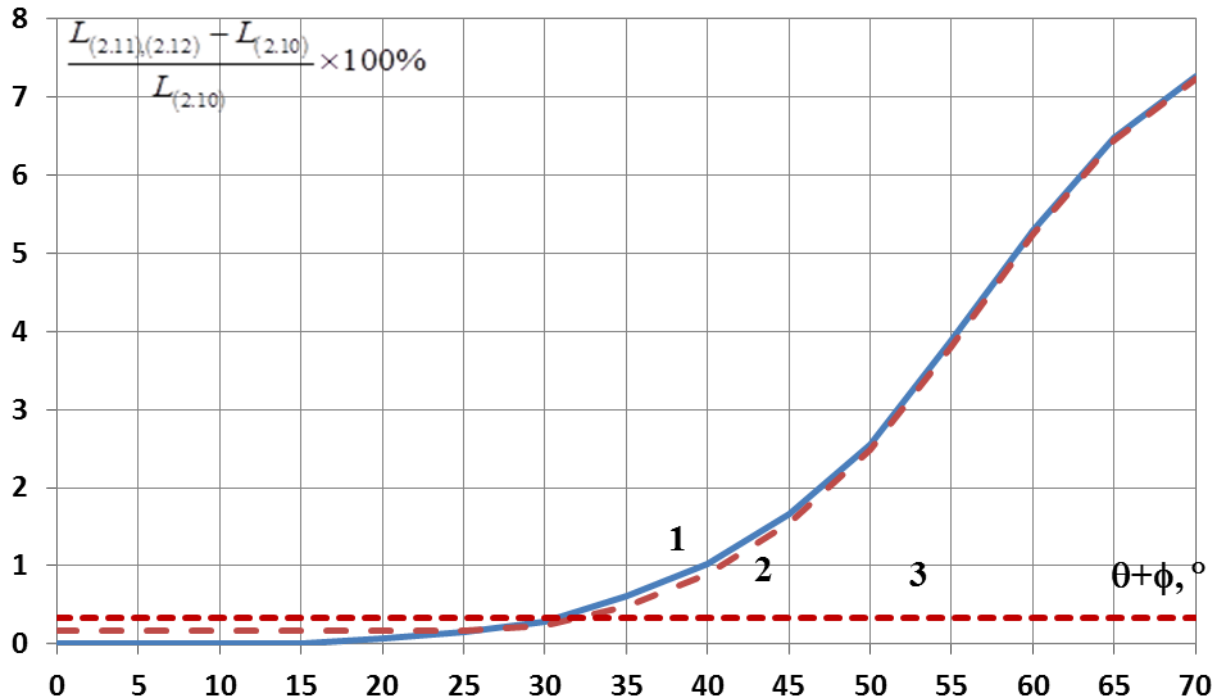


Рис. 2.7. Відносна похибка розрахунку проекцій пікселів L_θ та L_ϕ

Так як при відхиленні від надіру прямокутна матриця проекцій пікселів перетворюється в спотворений чотирикутник з нахиленими стовпчиками та рядками по відношенню до напрямку польоту КА, то це приведе до зміщення зображення з стовбчика пікселів при роботі в режимі TDI та погіршенню якості зображення. Для урахування впливу цього ефекту необхідно знати величини кутів нахилу стовпчиків та рядків. На рис. 2.8 зображена деформована проекція ПЗЗ-матриці на ПЗ при відхиленні візирної осі від надіру по кутам тангажу та крену, де:

- φ_r – кут нахилу рядків проекції ПВ відносно напрямку польоту;
- φ_c – кут нахилу стовпчиків проекції ПВ відносно напрямку польоту.

Центри пікселів в кожному із стовпчику та рядку лежать на одній прямій, тобто для визначення нахилу проекції рядка (стовпчика) необхідно взяти будь-які два центри проекції пікселів в даному рядку (стовпчику).

Тобто, для визначення нахилу рядка $W_x = const$, а $W_y = var$ (змінна) і для колонки $W_y = const$, а $W_x = var$.

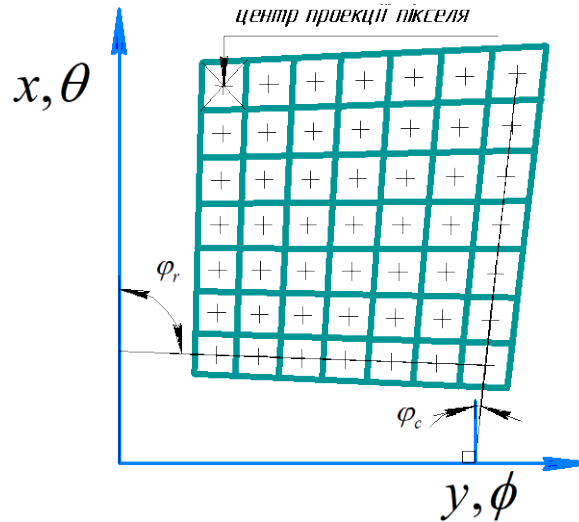


Рис. 2.8. Проекція пікселів МПВ на поверхні Землі [66]

Таким чином, нахил будь-якого стовпчика в ЛСК при послідовності розворотів «тангажу-крен» визначається формулою

$$tg(\varphi_c) = tg(W_y + \theta'') \sin(\theta). \quad (2.21)$$

Аналогічно була отримана формула для визначення нахилу рядків, яка в ЛСК при послідовності розворотів «тангажу-крен» має вигляд

$$tg\left(\varphi_r - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\sin(\theta'') tg(W_x)}{\cos(\theta) - \sin(\theta) \cos(\theta'') tg(W_x)}. \quad (2.22)$$

При відхиленні КА в ЛСК при послідовності «крен-тангаж» формули для розрахунку кутів нахилу стовпчиків та рядків будуть такими:

$$tg(\varphi_c) = \frac{\sin(\phi'') tg(W_y)}{\cos(\phi) - \sin(\phi) \cos(\phi'') tg(W_y)}, \quad (2.23)$$

$$tg\left(\varphi_r - \frac{\pi}{2}\right) = tg(W_x + \phi'') \sin(\phi). \quad (2.24)$$

2.4 Методи підвищення якості зображення в сканерах високого і надвисокого просторового розділення

Зазвичай якість зображення ОЕС описується модуляційною передавальною функцією. Сумарна МПФ системи «атмосфера – сканер» $M_{\Sigma}(v_x, v_y)$ дорівнює добутку МПФ окремих складових, які впливають на якість зображення (атмосфера, об'єктив, фотоприймач, фазове положення тест-об'єкта, зміщення зображення об'єкту під час зйомки відносно пікселя за рахунок руху КА по орбіті, нестабільність положення осі КА та вібрації, зміщення зображення об'єкту під час зйомки в режимі TDI відносно стовпця пікселів за рахунок обертання Землі та зміни кута візування).

МПФ сканера при зйомці зі змінними кутами візування

Сумарна МПФ дорівнює:

- в напрямку польоту КА:

$$M_{\Sigma}(v_x) = M_O(v_x)M_{ATM}(v_x)M_D(v_x)M_{\Phi}(v_x, \Delta x)M_{3C}(v_x, \Delta x')M_{\omega}(v_x) \cdot M_B(v_x)M_{III}(v_x) \quad (2.25)$$

- в напрямку перпендикулярному польоту КА:

$$M_{\Sigma}(v_y) = M_O(v_y)M_{ATM}(v_y)M_D(v_y)M_{\Phi}(v_y, \Delta y)M_{\omega}(v_y) \cdot M_B(v_y)M_{III}(v_y)M_{TDI}(v_y) \quad (2.26)$$

Модуляційні передавальні функції об'єктива $M_O(v_x, v_y)$, атмосфери $M_{ATM}(v_x, v_y)$, фотоприймача $M_D(v_x, v_y)$ та фази $M_{\Phi}(v_x, v_y)$ описані раніше для багатоспектрального сканера [68] та можуть бути використані і для ОЕС високої та надвисокої просторової розрізненості. Інші складові сумарної МПФ для ОЕС надвисокого просторового розрізнення, де використовуються ПЗЗ-лінійки з часовою затримкою накопичення (ЧЗН), відрізняються від описаних раніше.

Для підвищення радіометричного (енергетичного) розділення ОЕС ДЗЗ високого і надвисокого розрізнення використовують ПЗЗ-лінійки з часовою затримкою накопичування (ЧЗН, TDI – time delay integration). Принцип

роботи ПЗЗ-лінійки з ЧЗН полягає в накопичуванні сигналу від об'єкту наступними рядками ПЗЗ-лінійки. При цьому швидкість і вектор передачі заряду з пікселя попереднього рядка в піксель наступного рядка повинні співпадати з швидкістю і вектором переміщення зображення в фокальній площині об'єктива.

Похибка висоти КА, нестабільність орієнтації його осей, зміщення поверхні Землі під час експозиції за рахунок обертання Землі навколо своєї осі призводить до зміщення зображення відносно стовбців матриці ПЗЗ і розбіжності швидкості переміщення заряду з швидкістю переміщення зображення, що приводить до «змазу» зображення і погіршенню його якості.

Розглянемо окремі МПФ в рівняннях (2.25) і (2.26).

2.4.1 Вплив нестабільності положення осі космічного апарата на МПФ сканера

Свій внесок у зменшення результуючої МПФ за рахунок зсуву зображення за час експозиції вносить і нестабільність положення осі космічного апарата $\omega_{x,y}$. При космічній зйомці в режимі «push-broom» для сканування окремих рядків знімку та їх подальшому стикуванню між собою КА обертається навколо центру Землі з певною кутовою швидкістю. Під час цього руху виникають похибки в управлінні, які призводять до похибок кутової швидкості $\omega_{x,y}$. За час формування рядка t_l при числі N_{TDI} стадій накопичення TDI відбувається зсув зображення у фокальній площині об'єктива сканера на величину [69]:

$$\begin{cases} \Delta X_{\omega} = f'_{ob} \left(\operatorname{tg}(W_x + t_l \omega_x N_{TDI}) - \operatorname{tg}(W_x) \right); \\ \Delta Y_{\omega} = f'_{ob} \left(\operatorname{tg}(W_y + t_l \omega_y N_{TDI}) - \operatorname{tg}(W_y) \right), \end{cases} \quad (2.27)$$

де ω_x й ω_y - кутові швидкості зсуву осі КА в напрямку польоту і перпендикулярно напрямку польоту (град. /сек).

Відхилення орієнтації осі КА при зйомці земної поверхні призводить до зміни положення об'єкта відносно ПЗЗ-лінійки, тобто до «змазу» зображення.

Функція зменшення МПФ за рахунок нестабільності положення осі КА має вигляд:

$$M_{\omega}(v_x, v_y) = \frac{\sin(\pi v_x \Delta X_{\omega})}{\pi v_x \Delta X_{\omega}} \frac{\sin(\pi v_y \Delta Y_{\omega})}{\pi v_y \Delta Y_{\omega}}. \quad (2.28)$$

2.4.2 Вплив вібрацій космічного апарата на МПФ сканера

Орієнтація КА в момент зйомки відбувається за рахунок роботи гіроскопічних маховиків, які призводять до вібрації оптичних систем дистанційного зондування. Це призводить до зміщення зображення по гармонічному закону відносно пікселів фотоприймача під час експозиції об'єкта. Шлях переміщення зображення будемо моделювати функцією

$$d(t) = \frac{b}{2} \cdot \cos(\omega_v t), \quad (2.29)$$

де $b/2$ – амплітуда коливань в площині фотоприймача, а ω_v – циклічна частота вібрацій.

Амплітуда коливань в площині приймача випромінювання визначається, як

$$b_{x,y} = 0.5 f'_{ob} \left(\operatorname{tg}(W_{x,y} + \sigma_v) - \operatorname{tg}(W_{x,y} - \sigma_v) \right). \quad (2.30)$$

де $W_{x,y}$ – розташування пікселя в кутових координатах; σ_v – кутова амплітуда коливань.

Якщо період коливань менше за час експозиції, то вплив зміщення зображення відносно фотоприймача на зменшення модуляційної передавальної функції описується функцією Бесселя [70]

$$MTF_B(v_x, v_y) = \left| J_0(2\pi v_x b_x, 2\pi v_y b_y) \right|. \quad (2.31)$$

2.4.3 Вплив нестабільності висоти польоту космічного апарата на МПФ сканера

Хоча формально КА рухається по круговій сонячно-синхронній орбіті, в наслідок еліптичності форми Землі, гравітаційного поля Землі та рельєфу місцевості висота зйомки різних ділянок Землі може відрізнятися до ± 20 км.

Оскільки швидкість переміщення підстильної поверхні V_{nm} залежить від висоти орбіти, то при зміні висоти орбіти буде мінятися й швидкість V_{nm} . Так як частота зйомки рядків f_l розрахована на номінальну висоту орбіти, то за час формування рядка зображення t_l підсупутникова точка пройде шлях, який відрізняється від номінального кроку між центрами пікселів у зображенні на поверхні Землі. Різниця швидкостей зміщення зображення в фокальній площині буде

$$\Delta V_{зоб} = \frac{f'_o V_{nm} \Delta h}{h_f (h_f + \Delta h)}. \quad (2.32)$$

При роботі в режимі TDI зображення на кожний наступний рядок буде приходити зі зсувом $\Delta S'_x$ відносно попереднього рядка. Середній зсув зображення в площині матриці ПЗС відносно центру пікселя буде становити:

$$\Delta S_{x_{CP}} = 0,5 \cdot t_l N_{TDI} \cdot \Delta V_{зоб} \cdot \cos^2(\theta \pm \omega_x) \cos(\phi \pm \omega_y). \quad (2.33)$$

Тоді МПФ сканера за рахунок нестабільності висоти КА описується функцією

$$M_{\Delta h}(v_x) = \left| \cos(2\pi \Delta S'_{x_{CP}} v_x) \right|. \quad (2.34)$$

Оскільки зсув відбувається за рахунок руху КА в площині руху, то зміщення зображення по осі, що перпендикулярна напрямку руху майже не відбувається і ним можна знехтувати.

З формули (2.33) видно, що при зміні кутів нахилу КА θ та ϕ буде мінятися і зсув зображення в площині МПВ, тому для узгодження швидкості зміщення з кроком між проекціями пікселів потрібно змінювати частоту зйомки, тобто період рядкової розгортки t_l .

2.4.4 МПФ сканера за рахунок обертання земної кулі

Космічні апарати систем ДЗЗ обертаються навколо Землі по круговим орбітам з висотою від 600 км до 800 км. В спрощеній моделі прийнято, що середній радіус Землі складає $R_z = 6371,032$ км. Але насправді форма Землі має форму двовісного еліпсоїда з радіусами Землі біля полюсів $R_{min} = 6356,78$ км і на екваторі $R_{max} = 6378,16$ км. Радіус Землі в точці Землі з географічною широтою φ можна розрахувати за формулою

$$R_z(\varphi) = \sqrt{R_{zmin}^2 \sin^2(\varphi) + R_{zmax}^2 \cos^2(\varphi)}. \quad (2.35)$$

Лінійна швидкість, з якою переміщається точка на поверхні Землі за рахунок її обертання в залежності від її географічної широти визначається за формулою

$$V_z(\varphi) = \omega_z R_z(\varphi) \cos(\varphi), \quad (2.36)$$

де $\omega_z = 15''/c$ – кутова швидкість Землі.

Орбітальна кругова лінійна швидкість V_s переміщення супутника по його орбіті складає

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{R_z + h_f}}, \quad (2.37)$$

а величина швидкості лінійного переміщення підсупутникової точки по поверхні Землі V_{nm} в напрямку польоту супутника

$$V_{nm} = \frac{\sqrt{\mu} R_z}{\sqrt{(R_z + h_f)^3}}. \quad (2.38)$$

де h_f – висота орбіти від поверхні Землі з радіусом $R_z = 6371$ км;

$\mu = 398602 \text{ км}^3/\text{с}^2$ – гравітаційний параметр Землі.

Для руху КА по сонячно-синхронній орбіті площа орбіти повинна розташовуватись під кутом i до екватору (рис. 2.9), який визначається за формулою [71,72]

$$i = \arccos \left(-\frac{1}{k_3} \left(\frac{R_0}{R_3} \right)^{\frac{7}{2}} \right), \quad (2.39)$$

де $k_3 = 10.10949$ – стала для Землі, яка означає, що для супутника висота над рівнем моря $h = 0$ і $i = 0$ центральна прецесія оцінюється в 10,11 разів більше ніж кутова швидкість земної осі при руху навколо Сонця.

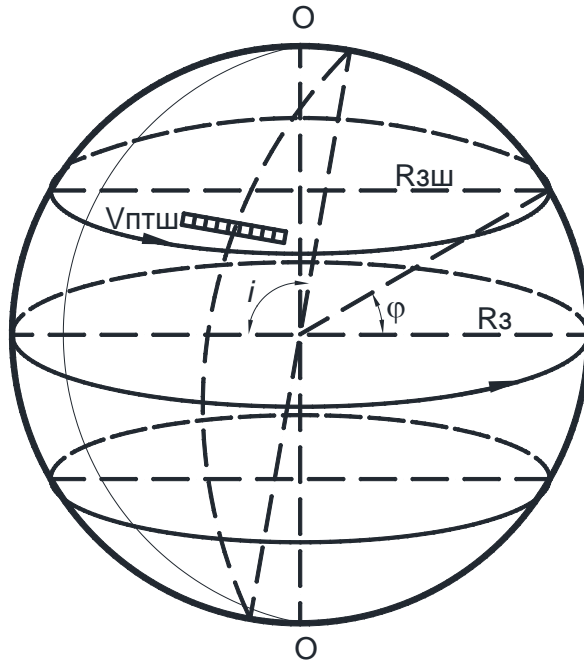


Рис. 2.9. Рух космічного апарата по ССО [69]

Швидкість зміщення підсупутникової точки вздовж широти V_{nm} залежить від географічної широти Земної поверхні φ , зйомку якої проводить КА (рис. 2.9). На екваторі лінійна швидкість поверхні буде найбільшою, а поблизу полюсів – найменшою.

Так як вектор швидкості підсупутникової точки направлено вздовж паралелі, а вектор руху КА розташовано під кутом i до цього напрямку, то швидкість руху підсупутникової точки в залежності від географічної широти буде [69]

$$V_{nm}(\varphi) = R_3(\varphi) \sqrt{\frac{\mu}{R_0^3} + \omega_3^2 \cos^2(\varphi) + 2\omega_3 \cos(\varphi) \frac{\sqrt{\mu}}{k_3} R_0^2 R_3^{-\frac{7}{2}}}, \quad (2.40)$$

а швидкість руху зображення в фокальній площині сканера буде дорівнювати

$$V_{зоб}(\varphi) = V_{nm}(\varphi) \frac{f'_o}{h(\varphi)}, \quad (2.41)$$

де $h(\varphi) = (R_3 + h_f) - R_t(\varphi)$.

Під час зйомки Земля обертається навколо своєї осі, що призводить до зміщення зображення в фокальній площині об'єктива.

Сонячно-синхронні орбіти мають нахил площини орбіти відносно площини екватора Землі $i > 90^\circ$. В цьому випадку напрямок швидкості переміщення об'єктів на поверхні Землі в полі зору об'єктива не буде співпадати з напрямком польоту КА. Це призводить до того, що зображення одного і того ж об'єкту не буде переміщатися вздовж певного стовпчика ПЗЗ-лінійки з TDI, що призведе до «змазу» зображення та зменшення МПФ. Для знаходження куту між напрямком польоту та вектором зміщення зображення під супутникової точки розглянемо проекції швидкостей, де паралельна складова – це проекція вектору швидкості в напрямку польоту КА, а перпендикулярна складова – це проекція на вісь поперек напрямку польоту КА (рис. 2.10).

Кут $\varphi_{зоб}$ вектора \vec{V}_{nm} відносно напрямку польоту знайдемо із системи рівнянь (рис. 2.10):

$$\begin{cases} V_{\kappa a}^{\parallel} = V_{\kappa a}(\varphi), \\ V_{\kappa a}^{\perp} = 0, \end{cases} \quad \text{та} \quad \begin{cases} V_3^{\parallel} = -V_3(\varphi) \cos(i), \\ V_3^{\perp} = V_3(\varphi) \sin(i). \end{cases} \quad (2.42)$$

Звідки

$$\operatorname{tg}(\varphi_{зоб}) = \frac{V_{\kappa a}^{\perp} + V_3^{\perp}}{V_{\kappa a}^{\parallel} + V_3^{\parallel}} = \frac{V_3(\varphi) \sin(i)}{V_{\kappa a}(\varphi) - V_3(\varphi) \cos(i)}. \quad (2.43)$$

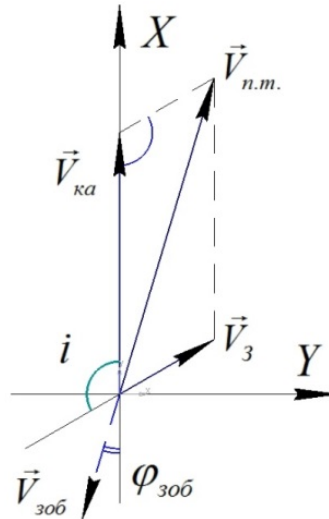


Рис. 2.10. Проекції вектора швидкості руху зображення підсупутникової точки [69]

Так як площина сонячно-синхронної орбіти розташована під кутом $i \approx 98,3^\circ$ до площини екватору Земної кулі, то зміщення зображення відбувається вздовж рядків (вісь Y) та вздовж стовпчиків (вісь X).

На величину зміщення зображення в наслідок обертання Землі ΔS_{3ob}^\perp накладається також зміщення за рахунок нахилу стовпчиків Δy при відхиленні візирної осі від надира (рис.2.11) [69].

Зміщення зображення в площині МПВ за рахунок обертання Землі визначається за формулою

$$\Delta S_{3ob}^\perp = t_{str} (N_{TDI} - 1) V_{3ob} \cdot \sin(\varphi_{3ob}) \cos(\phi). \quad (2.44)$$

Різниця координат між центрами першого і останнього зображення в режимі обробки TDI в напрямку перпендикулярному до польоту:

$$\Delta y = t_{str} (N_{TDI} - 1) \cdot V_{3ob} \cdot \cos(\varphi_{3ob} - \varphi_c) \cos(\phi) \operatorname{tg}(\varphi_c). \quad (2.44)$$

Тоді зменшення МПФ за рахунок поперечного зміщення зображення відносно стовпчиків пікселів буде [68]:

$$MTF_E(v_y) = \left| \operatorname{sinc} \left(v_y (\Delta y - \Delta S_{3ob}^\perp) \right) \right|. \quad (2.45)$$

Вплив обертання Землі на «змаз» зображення можна значно зменшити, якщо розвернути КА по куту рискання так, щоб ПЗЗ-лінійка знаходилися під кутом φ_{3ob} до напрямку польоту КА.

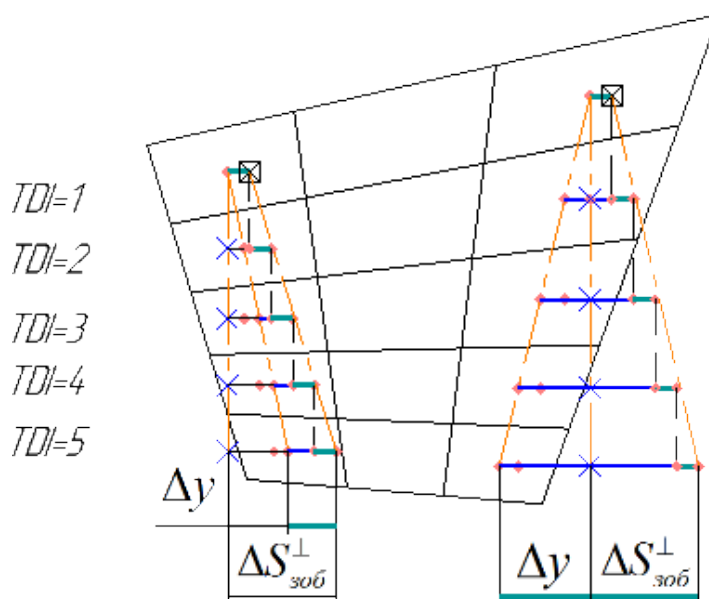


Рис. 2.11. Зміщення зображення за рахунок обертання Землі та нахилу стовпчиків МПВ [69]

2.4.5 МПФ сканера при відхиленні візирної осі від надиру

При відхиленні візирної осі космічного сканера від надиру відбувається збільшення розміру проекцій пікселів на ПЗ в напрямку руху і в напрямку перпендикулярному напрямку руху відповідно до формул (2.19), (2.20) та нахил стовпчиків і рядків по відношенню до напрямку руху відповідно формулам (2.23), (2.24). Для компенсації «змазу» зображення, що обумовлено обертальним рухом Землі та зміщенням зображення об'єкту від прямолінійного руху по стовпчику, КА розвертають по куту ристання на кут $\varphi_{ЗОБ}$ в залежності від географічної широти φ ділянки Землі, що підлягає зйомці відповідно до формули (2.21). Але повністю компенсувати «змаз» зображення можна тільки для одного стовпчика, наприклад, центрального. Стовпчики, що розташовані по краях від центрального не будуть оптимально повернуті по куту ристання для компенсації «змазу» і тому на краях ПЗЗ-лінійки з TDI буде відбуватися «змаз» зображення, який приведе до падіння МПФ в напрямку перпендикулярному руху (рис. 2.12). Величина зміщення в площині приймача випромінювання вираховується по формулі [73]

$$\Delta Y_{\theta,\phi} = \frac{V_D}{\cos^2(\theta \pm \omega_X) \cos(\phi \pm \omega_Y)} (N_{TDI} - 1) \operatorname{tg} \varphi_C. \quad (2.46)$$

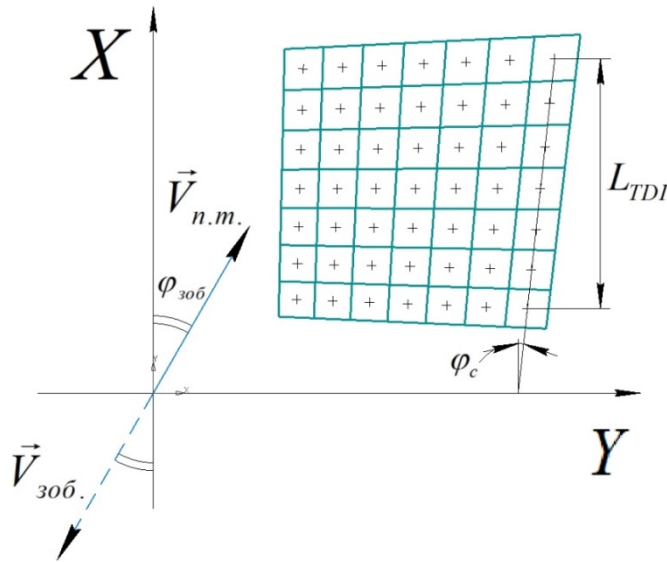


Рис. 2.12. Зміщення зображення стовпчика ПЗЗ-лінійки при його нахилу [73]

Значно більше впливає відхилення осі від надиру на величину зміщення уздовж стовпчиків. Якщо частота формування рядків зображення f_l не змінюється по відношенню частоти строк в надирі, то із-за зміни шагу між проекціями пікселів відбувається поступове зміщення зображення відносно центрів наступних пікселів в стовпчику, тобто швидкість переносу заряду по стовпчику в TDI ПЗЗ-лінійці не співпадає з швидкістю руху зображення, що призводить до «змазу» зображення і падінню МПФ в напрямку руху КА. Величина зміщення уздовж напрямку польоту в площині приймача випромінювання вираховується за формулою

$$\Delta X_{\theta,\phi} = \left[\frac{V_D}{\cos^2(\theta \pm \omega_X) \cos(\phi \pm \omega_Y)} \cos(\varphi_{306} - \varphi_C) - \frac{V_{п.т} \cdot f'_O}{f_{СТР} \cdot h_O} \right] (N_{TDI} - 1). \quad (2.47)$$

В результаті цих зміщень додаткове падіння МПФ при відхиленні візирної осі від надиру в напрямку польоту та в напрямку перпендикулярному напрямку польоту буде

$$M_{\theta,\phi}(v_x, v_y) = \frac{\sin(\pi v_x \Delta X_{\theta,\phi})}{\pi v_x \Delta X_{\theta,\phi}} \frac{\sin(\pi v_y \Delta Y_{\theta,\phi})}{\pi v_y \Delta Y_{\theta,\phi}}. \quad (2.48)$$

Якщо на величину поперечного зміщення зображення з стовпчика не можна вплинути, то на величину поздовжнього зміщення зображення, можна впливати зміною частоти рядкової розгортки f_l . Підібравши частоту рядків таким чином, щоб швидкість руху зображення підсупутникової точки співпадала з швидкістю руху переносу заряду з одного пікселя стовпчика TDI ПЗЗ-лінійки на наступний піксель в стовпчику можна добитися, що при відхиленні візирної осі від надиру МПФ ОЕС сканера буде такою же, як і при зйомці в надирі.

Другим шляхом для компенсації впливу зміни величини проекції пікселя при відхиленні візирної осі від надиру є надання КА додаткової кутової швидкості в напрямку польоту. Узгодження відстаней між центрами проекцій пікселів та кроком вибірки інформації при незмінній частоті рядкової розгортки f_l можна досягти, якщо примусово розвертати КА по куту тангажу в напрямку польоту з кутовою швидкістю

$$\omega_\theta = \frac{\arctg\left(\frac{\Delta X_{\theta,\phi}}{f'_o}\right) f_l}{(N_{TDI} - 1)}. \quad (2.49)$$

2.4.6 МПФ сканера при зйомці зі змінними кутами візування

Іноді потрібно проводити зйомку поверхні Землі вздовж об'єктів, орієнтація яких має змінний кут відносно вектору переміщення підстильної поверхні. Для цього КА примусовий розвертають по куту крену ϕ с заданою кутовою швидкістю ω_ϕ . Величина, на яку буде зміщено зображення відносно стовбців матриці TDI ПЗЗ-лінійки дорівнює:

$$\Delta Y_\phi = f'_{ob} \left(\operatorname{tg}(W_y + t_{str} \omega_\phi N_{TDI}) - \operatorname{tg}(W_y) \right). \quad (2.50)$$

При цьому якість зображення погіршиться за рахунок МПФ «зсуву»:

$$M_{\omega_{\phi}}(v_y) = \frac{\sin(\pi v_y \Delta Y_{\omega_{\phi}})}{\pi v_y \Delta Y_{\omega_{\phi}}}. \quad (2.51)$$

Оскільки вплив на МПФ сканера зміщення зображення поперек напрямку руху КА обумовлені різними факторами, але описуються однаковими МПФ, то їх вплив можна об'єднати в одну МПФ, яка має вигляд

$$M_{E,\omega_{\phi}}(v_y) = \left| \text{sinc} \left(v_y \left(\Delta y - \Delta S_{\text{зоб}}^{\perp} + \Delta Y_{\phi} \right) \right) \right|. \quad (2.52)$$

2.4.7 Вимоги до космічного та ОЕС високої та надвисокої просторової роздільної здатності

Для практичного застосування наведених в підрозділі 2.4 методів розрахунків розглянемо сканер високої роздільної здатності (СВРЗ) з параметрами:

- фокусна відстань об'єктива $f'_o = 2258$ мм;
- діаметр входної зіниці $D_p = 226$ мм;
- кутове поле зору об'єктива $W_x = 0,78'$; $2W_y = 8^\circ$;
- розмір пікселя ПЗЗ-лінійки $V_D \times W_D = 8 \times 8$ мкм;
- необхідне число стадій накопичення в ПЗЗ-лінійці $N_{TDI} = 8$;
- висота орбіти $h_f = 668$ км;
- розмір проекції між центрами пікселів в надирі $GSD = 2,37$ м;
- кутове миттєве поле зору - $W_{VD} = 0,7''$

та сканер надвисокої просторової роздільної здатності (СНВРЗ) з параметрами:

- фокусна відстань об'єктива $f'_o = 6680$ мм;
- діаметр входної зіниці $D_p = 530/190$ мм;
- кутове поле зору об'єктива $W_x = 0,46'$; $2W_y = 1^\circ 27'$;
- розмір пікселя ПЗЗ-лінійки $V_D \times W_D = 7 \times 7$ мкм;
- необхідне число стадій накопичення в ПЗЗ-лінійці $N_{TDI} = 64$;
- висота орбіти $h_f = 668$ км;
- розмір проекції між центрами пікселів в надирі $GSD = 0,7$ м;

- кутове миттєве поле зору $W_{VD} = 0,2''$.

На рис. ДГ,1 і ДГ,2 в Додатку Г наведені МПФ, які викликані нестабільністю осі КА в просторі, що розглянуті в підрозділі 2.4.1 глави, для СВРЗ та СНВРЗ. Для знаходження допустимої нестабільності положення осі порівнюємо кут відхилення візирної осі за час експозиції з кутовим миттєвим полем зору сканера. Кут відхилення візирної осі ε за час експозиції залежить від кутової швидкості відхилення осі ω , часу формування рядка t_l та необхідного числа стадій накоплення N_{TDI}

$$\varepsilon = t_l \omega N_{TDI}. \quad (2.53)$$

Для СВРЗ при кутовій швидкості відхилення осі $\omega = 0,02^\circ/c = 72''/c$ за час експозиції $t_l N_{TDI} = 0,000348 \times 8 = 0,00278 c$ візирна вісь відхилиться на кут $\varepsilon = 0,2''$, тобто на 0,286 частину пікселя. При цьому падіння МПФ на частоті Найквіста складе 3%. При кутовій швидкості відхилення осі $\omega = 0,05^\circ/c = 180''/c$ візирна вісь відхилиться на 0,715 частину пікселя, а падіння МПФ складе 16%. При $\omega = 0,1^\circ/c = 360''/c$ візирна вісь відхилиться на 1,43 частину пікселя, а падіння МПФ складе 57%.

Для СНВРЗ при кутовій швидкості відхилення осі $\omega = 0,0025^\circ/c = 9''/c$ за час експозиції $t_{str} N_{TDI} = 0,000103 \times 64 = 0,00658 c$ візирна вісь відхилиться на кут $\varepsilon = 0,06''$, тобто на 0,296 частину пікселя. При цьому падіння МПФ на частоті Найквіста складе 3%. При кутовій швидкості відхилення осі $\omega = 0,005^\circ/c = 18''/c$ візирна вісь відхилиться на 0,592 частину пікселя, а падіння МПФ складе 12%. При $\omega = 0,01^\circ/c = 36''/c$ візирна вісь відхилиться на 1,184 частину пікселя, а падіння МПФ складе 43%. Для отримання падіння МПФ на частоті Найквіста менш ніж 10% потрібно, щоб відхилення візирної осі за час експозиції за рахунок нестабільності осі КА складало менше 0,5 миттєвого кутового поля зору.

На рис. ДГ,3 та рис. ДГ,4 додатку Г для СВРЗ та СНВРЗ наведені МПФ, які викликані відхиленням візирної осі в наслідок високочастотної

вібрації. Для знаходження допустимої нестабільності положення осі внаслідок вібрації порівняємо амплітуду кутового відхилення візирної осі з кутовим миттєвим полем зору сканера. Для СВРЗ при кутовій амплітуді коливань візирної осі $b = 0,0875''$, тобто 0,125 частини пікселя падіння МПФ на частоті Найквіста складає 4%, при $b = 0,175''$, тобто 0,25 частини пікселя – 14%, а при $b = 0,35''$, тобто 0,5 частини пікселя – 51%. Для СНВРЗ при кутовій амплітуді коливань візирної осі $b = 0,025''$, тобто 0,125 частини пікселя падіння МПФ на частоті Найквіста складає 4%, при $b = 0,05''$, тобто 0,25 частини пікселя – 13%, а при $b = 0,1''$, тобто 0,5 частини пікселя – 48%. Допустима амплітуда кутових коливань візирної осі при вібрації складає 0,25 миттєвого кутового поля зору.

На рис. ДГ,5 та рис. ДГ,6 додатку Г для СВРЗ та СНВРЗ наведені МПФ, які викликані відхиленням висоти орбіти при сталій частоті зйомки. При зміні висоти міняється розмір проекції пікселя і при сталій частоті рядків при числі стадій накопичення N_{TDI} відбудеться зміщення зображення об'єкту з центру пікселя на величину

$$\Delta X = \frac{\Delta h}{h_f} N_{TDI}. \quad (2.54)$$

Для СВРЗ при максимально можливому відхиленню висоти орбіти $\Delta h = 20$ км зміщення зображення об'єкту з центра пікселя складе $\Delta X = 0,24$ пікселя, а падіння МПФ на частоті Найквіста – 7%. Для СНВРЗ при відхиленню висоти орбіти $\Delta h = 2,5$ км зміщення зображення об'єкту з центра пікселя складе $\Delta X = 0,24$ пікселя, а падіння МПФ на частоті Найквіста – 7%. При $\Delta h = 5$ км зміщення зображення об'єкта з центру пікселя складе $\Delta X = 0,48$ пікселя, а падіння МПФ на частоті Найквіста – 28%. При $\Delta h = 7,5$ км зміщення зображення об'єкта з центру пікселя складе $\Delta X = 0,72$ пікселя, а падіння МПФ на частоті Найквіста – 51%. Допустиме зміщення зображення з центру пікселя при зйомці зі змінною висотою орбіти не

повинно перевищувати 0,25 розміру пікселя, а допустиму зміну висоти орбіти при сталій частоті рядків при зйомці можна розрахувати за формулою

$$\Delta h = \frac{h_f}{4N_{TDI}}. \quad (2.55)$$

На рис. ДГ,7 та рис. ДГ,8 додатку Г для СВРЗ та СНВРЗ наведені МПФ, які викликані зміщенням зображення в площині ПЗЗ-лінійки за рахунок обертання Землі навколо своєї осі. Вплив обертання Землі на «змаз» зображення можна значно зменшити, якщо розвернути КА по куту рискання так, щоб колонки TDI лінійки знаходилися під кутом $\varphi_{зоб}$ до напрямку польоту КА. В залежності від географічної широти кут $\varphi_{зоб}$ змінюється в межах $1^{\circ}11' \leq \varphi_{зоб} \leq 3^{\circ}48'$ і стає максимальним при зйомці на екваторі і мінімальним для широти $\varphi = 70^{\circ}$. Для широти Києва $\varphi = 50^{\circ}$ потрібен розворот КА по куту рискання на величину $\varphi_{зоб} = 2^{\circ}24'$. Допустима похибка розвороту $\Delta\varphi_{зоб}$ для різних сканерів може бути різною. Для СВРЗ похибка недовороту $\Delta\varphi_{зоб} = 2^{\circ}24'$ приведе до падіння МПФ на частоті Найквіста на 4%, тобто зйомку на широті Києва можна проводити без довороту по куту рискання. Для СНВРЗ похибка недовороту $\Delta\varphi_{зоб} = 15'$ приведе до падіння МПФ на частоті Найквіста на 3%, а при $\Delta\varphi_{зоб} = 30'$ - на 12%. Допустиму похибку розвороту по куту рискання для компенсації впливу обертання Землі можна визначити за формулою

$$\Delta\varphi_{зоб} = \arctg\left(\frac{0,3}{N_{TDI}}\right). \quad (2.56)$$

На рис. ДГ,9 та рис. ДГ,10 додатку Г для СВРЗ та СНВРЗ наведені МПФ, які обумовлені відхиленням візирної осі від надиру при сталій частоті рядків. При відхиленні візирної осі від надиру відбувається збільшення розміру проєкцій пікселів на ПЗ та поступове зміщення зображення об'єкта з центру пікселів стовпчиків. Для СВРЗ при відхиленні по кутах тангажу та крену $\theta = 5^{\circ}$, $\phi = 5^{\circ}$ падіння МПФ на частоті Найквіста складає 2%. Потрібна

зміна частоти рядків при цьому складає $\Delta f = 51$ Гц при номінальній частоті рядків для надиру $f = 2874$ Гц, тобто 1,8%. При кутах $\theta = 10^\circ$, $\phi = 10^\circ$ падіння МПФ на частоті Найквіста складає 26%, а необхідна зміна частоти рядків – 3,6%. Для СНВРЗ при відхиленні по кутах тангажу та крену $\theta = 2^\circ$, $\phi = 2^\circ$ падіння МПФ на частоті Найквіста складає 4%. Потрібна зміна частоти рядків при цьому складає $\Delta f = 29$ Гц при номінальній частоті строк для надиру $f = 9880$ Гц, тобто 0,29%. При кутах $\theta = 3^\circ$, $\phi = 3^\circ$ падіння МПФ на частоті Найквіста складає 21%, а потрібна зміна частоти рядків – 0,66%. Таким чином, припустимо відхилення візирної осі від надиру без зміни частоти рядків складає до $\theta = 5^\circ$, $\phi = 5^\circ$ для СВРЗ і $\theta = 2^\circ$, $\phi = 2^\circ$ для СНВРЗ.

На рис. ДГ.11 та рис. ДГ.12 в додатку Г для СВРЗ та СНВРЗ наведені МПФ, які викликані відхиленням візирної осі від надиру при примусовому розвороті по куту крену ϕ з заданою кутовою швидкістю ω_ϕ . Для СВРЗ при $\omega_\phi = 0,02^\circ/\text{с}$ падіння МПФ на частоті Найквіста складає 3%, а при $\omega_\phi = 0,05^\circ/\text{с}$ – 17%. Для СНВРЗ при $\omega_\phi = 0,002^\circ/\text{с}$ падіння МПФ на частоті Найквіста складає 2%, а при $\omega_\phi = 0,005^\circ/\text{с}$ – 12%. Такі малі допустимі кутові швидкості примусового розвороту по крену не можуть суттєво змінити кут візування на об'єкт, а тому примусове відхилення візирної осі по куту крену є недоцільним для використання.

2.5 Радіометричне розділення при відхиленні візирної осі сканера від надиру

Радіометричне або енергетичне розділення означає мінімальну різницю між яскравістю або відбиваючою здатністю об'єкта і фону великого розміру, яка може бути виявлена оптико-електронною системою сканера з заданою ймовірністю. Для збільшення можливостей спостереження за об'єктами сучасні системи ДЗЗ можуть змінювати кут огляду, відхиляючи візирну вісь від надиру. Умови спостереження при цьому будуть інші, чим при спостереженні в надир. Спектральна яскравість об'єкту і фону при

спектральній освітленості земної поверхні $E_0(\lambda)$ з врахуванням того, що об'єкт і фон відбивають сонячне випромінювання по закону Ламберта, в заданому спектральному діапазоні визначаються, як [57]

$$L_t(\lambda) = \rho_t(\lambda) \frac{E_0(\lambda)}{\pi} \text{ і } L_b(\lambda) = \rho_b(\lambda) \frac{E_0(\lambda)}{\pi}, \quad (2.57)$$

де ρ_t та ρ_b відповідно альbedo об'єкту та фону.

Якщо візирна (оптична) вісь об'єктиву відхилена від надиру OO_1 на кут θ_{vx} (рис. 2.13), то спектральний потік випромінювання, який попадає в об'єктив буде дорівнювати

$$\Phi_t(\lambda) = \tau_A(\lambda) L_t(\lambda) A_t \Omega_o \cos \theta_{vx}, \quad (2.58)$$

де $\tau_A(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери, A_t – розмір об'єкту, який відповідає миттєвому куту поля зору системи, а $\Omega_o = A_p / R^2$ – просторовий кут, усередині якого світло падає на вхідну зіницю об'єктиву (рис. 2.13).

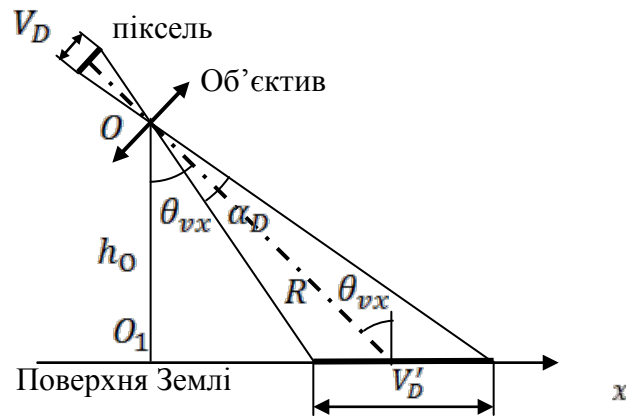


Рис. 2.13. Схема визначення просторового розділення при відхиленні візирної осі сканера від надиру [67]

Інтегральне освітлення пікселя фотоприймача випромінювання від об'єкту спостереження буде

$$E_t = \frac{1}{A_D} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_t(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda = \frac{A_t \Omega_o \cos \theta_{vx}}{A_D} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_t(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda, \quad (2.59)$$

де $A_D = V_D W_D$ – площа проекції пікселя.

Для великого об'єкту площа, що формує потік випромінювання на піксель фотоприймача, визначається проекцією цього пікселя на поверхню Землі і дорівнює [74]

$$A_t = \frac{h_o V_D}{f_o' \cos^2 \theta_{vx}} \frac{W_D h_o}{f_o' \cos \theta_{vx}} = \left(\frac{h_o}{f_o'} \right)^2 \frac{A_D}{\cos^3 \theta_{vx}}. \quad (2.60)$$

З (2.60) видно, що з збільшенням кута огляду площа проекції пікселя теж збільшується. Це спричиняє погіршення просторового розділення, але в той же час повинно призвести до покращення радіометричного розділення.

Просторовий кут Ω_o може бути знайдено, як

$$\Omega_o = \frac{A_p}{R^2} = \frac{\pi D_p^2 \cos^2 \theta_{vx}}{4 h_f^2}, \quad (2.61)$$

де D_p діаметр вхідної зіниці об'єктиву.

Підставивши (2.57), (2.60) і (2.61) в (2.59) отримаємо

$$E_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_t(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda = \left(\frac{h_f}{f_o'} \right)^2 \frac{A_D}{\cos^3 \theta_{vx}} \frac{\pi D_p^2 \cos^2 \theta_{vx}}{4 h_f^2} \frac{\cos \theta_{vx}}{A_D} \times$$

$$\times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) \rho_t(\lambda) \frac{E_0(\lambda)}{\pi} d\lambda = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) E_0(\lambda) \rho_t(\lambda) d\lambda. \quad (2.62)$$

Інтегральне освітлення фотоприймача, яке генерується Земної поверхнею визначається аналогічним рівнянням

$$E_b = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) E_0(\lambda) \rho_b(\lambda) d\lambda. \quad (2.63)$$

Об'єкт спостереження на поверхні Землі буде виявлений, якщо між об'єктом і фоном існує різниця в освітленості, яку фотоприймач здатний виявить, тобто

$$\Delta E = E_t - E_b = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) E_0(\lambda) [\rho_t(\lambda) - \rho_b(\lambda)] d\lambda. \quad (2.64)$$

Радіометричне розділення космічного сканеру дистанційного зондування Землі визначається мінімальною різницею освітленості ΔE_n , яка в свою чергу залежить від граничної експозиції фотоприймача H_n

$$\Delta E_n = \frac{H_n}{t_i}, \quad (2.65)$$

де t_i – час накопичення (інтегрування) фотоприймача.

Для інтегральних параметрів, що залежать від довжини хвилі λ , рівняння (2.64) перетворюється в більш просте рівняння [75]

$$\Delta E_n = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o'} \right)^2 \tau_A \tau_o E_0 \Delta \rho_n, \quad (2.66)$$

де $\Delta \rho_n = \rho_t - \rho_b$ поріг контрасту коефіцієнта відбиття, тобто радіометричне розділення.

З системи рівнянь (2.65) та (2.66) отримуємо, що радіометричне розділення можна визначити як [76]

$$\Delta \rho_n = \frac{4H_n}{\tau_A \tau_o E_0 t_i} \left(\frac{f_o'}{D_p} \right)^2. \quad (2.67)$$

При «push-broom» скануванні, коли зображення кадру формується послідовною зйомкою рядків, що лежать один за одним, час формування рядків, а отже і час накопичення фотоприймача, залежить від величини проекції пікселя на поверхні Землі в напрямку польоту. При відхиленні від надиру візирної осі космічного сканера ДЗЗ величина проекції пікселя збільшується, а отже і необхідно збільшувати час накопичення фотоприймачем. З формули (2.67) випливає, що при збільшенні часу накопичення t_i радіометричне розділення $\Delta \rho_n$ покращиться при тих же самих інших умовах спостереження та характеристиках оптико-електронної системи спостереження.

Висновки до розділу 2

На основі процесу формування зображення в космічних сканерах удосконалено фізико-математичну модель оптико-електронної системи сканерів високого і надвисокого просторового розділення шляхом врахування впливу особливостей експлуатації сканерів на їх модуляційну передавальну функцію. Дослідження такої моделі дозволило:

1. Оптимізувати параметри сканерів з метою підвищення їх просторової роздільної здатності, а саме

1.1. Отримано формулу для знаходження необхідного діаметра світлової апертури об'єктива залежно від заданого просторового розділення, висоти орбіти супутника, робочого спектрального діапазону оптичної системи, необхідного значення МПФ об'єктива на частоті Найквіста та коефіцієнту екранування об'єктива.

1.2. Для значень коефіцієнта передачі контрасту (КПК) на частоті Найквіста в діапазоні $0 \leq M(\nu_N) \leq 0,25$ величина коефіцієнта центрального екранування $K_{ЕКР}$ оптичної системи в діапазоні $0 \leq K_{ЕКР} \leq 0,4$ не впливає на значення необхідного діаметра вхідної апертури D_p . Для значень КПК на частоті Найквіста $M(\nu_N) > 0,25$ значення необхідного діаметра вхідної апертури зростає із зростанням коефіцієнта $K_{ЕКР}$ при тому самому значенні КПК.

1.3. Більшість сучасних сканерів мають значення КПК об'єктива на частоті Найквіста в діапазоні $0,2 \leq M(\nu_N) \leq 0,3$.

1.4. Для одержання просторового розділення $GSD \leq 0,5$ м діаметр вхідної апертури D_p оптичної системи повинен бути більшим 630 мм. При підвищенні просторової роздільної здатності в 2 рази з $GSD = 1$ м до $GSD = 0,5$ м вага головного дзеркала збільшується в 9,3 рази, а вага всього сканера при цьому збільшиться в 8÷9 раз і складе не менш 400 кг.

1.5. Показано, що оптимальним діаметром світлової апертури D_p для отримання просторового розділення, близького до геометричної проекції пікселя, є діапазон $320 \leq D_p \cdot GSD \leq 370$, при якому МПФ на частоті Найквіста знаходиться в межах $0,21 \leq M(\nu_N) \leq 0,26$.

2. Розроблено математичну модель кутового руху візирних осей в локальній системі координат при відхиленні КА від надиру, дослідження якої дозволило

2.1. Отримати формули для точного знаходження величин проекцій пікселів на поверхні Землі та кутів нахилу стовпчиків і рядків матриці відносно напрямку руху КА з урахуванням кривизни поверхні Землі.

2.2. Запропоновано спрощену методику розрахунку величини проекцій пікселів на поверхні Землі, похибка якої в межах кутів відхилення візирної осі від надиру в межах $\theta + \phi \leq 40^\circ$, не перевищує 1%, а для максимального відхилення $\theta + \phi \leq 70^\circ$ не перевищує 7%.

2.3. Розроблено нові методи дослідження впливу на МПФ нестабільності положення осі і вібрацій КА, нестабільності висоти польоту КА, обертання Земної кулі, відхилення візирної осі від надиру при зйомці з змінними кутами візування.

3. Обґрунтовано вимоги до космічного апарату та ОЕСС сканера високої та надвисокої просторової роздільної здатності, а саме:

3.1. Відхилення візирної осі за час експозиції за рахунок нестабільності осі КА повинно складати менше 0,5 миттєвого кутового поля зору.

3.2. Допустима амплітуда кутових коливань візирної осі при високочастотній вібрації повинна складати не більше 0,25 миттєвого кутового поля зору.

3.3. Допустима зміна висоти орбіти при сталій частоті рядків при зйомці повинна бути $\Delta h \leq 0,25 \cdot h_f / N_{TDI}$.

3.4. Допустима похибка розвороту КА по куту рискання для компенсації впливу обертання Землі повинна бути $\Delta\varphi_{зоб} = \arctg(0,3/N_{TDI})$. Припустиме відхилення візирної осі від надиру без зміни частоти рядків складає до $\theta = 5^\circ$, $\phi = 5^\circ$ для сканерів з просторовим розділенням близько 2 м та $\theta = 2^\circ$, $\phi = 2^\circ$ для сканерів з просторовим розділенням менше 1 м.

РОЗДІЛ 3

ОПТИЧНІ СИСТЕМИ СКАНЕРІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ВИСОКОГО ТА НАДВИСОКОГО РОЗДІЛЕННЯ

Оптичні системи сканерів ДЗЗ високого та надвисокого розділення вимагають використання об'єктивів із значними фокусними відстанями. Тому такі об'єктиви будуються на основі дзеркальних або дзеркально-лінзових оптичних систем.

Дзеркальні об'єктиви мають ряд переваг: можливість роботи в широкому спектральному діапазоні; можливість створення довгофокусних систем з невеликими габаритами, невеликою масою за рахунок невеликої кількості оптичних елементів і застосування конструкції дзеркал порівняно невеликої ваги [77].

Невелика кількість оптичних елементів в свою чергу вимагає використання асферичних поверхонь у дзеркал для виправлення аберацій. Для систем ДЗЗ зазвичай використовують декілька типів об'єктивів: 1) об'єктив Річі-Кретьєна; 2) позаосьовий тридзеркальний анастигматичний об'єктив; 3) тридзеркальний анастигматичний об'єктив Корша [78].

Об'єктив Річі-Кретьєна добре відомий і не представляє інтерес для дослідження. Два інші найбільш частіше використовуються в системах ДЗЗ і є менш вивченими.

3.1 Метод проектування тридзеркального квазіортоскопічного об'єктиву з позаосьовим полем зору

Серед дзеркальних об'єктивів особливе місце займають тридзеркальні об'єктиви без екранування із позаосьовим щілинним полем зору, які одержали свій значний розвиток в останні роки [79]. Основною перевагою цих об'єктивів у порівнянні із класичними вісесиметричними дзеркальними системами із центральним екрануванням є значне підвищення значень

модуляційної передатної функції (МПФ), особливо на середніх просторових частотах [80].

В об'єктивах із трьома дзеркальними поверхнями в принципі можуть бути добре виправлені всі аберації, крім дисторсії [81]. Присутня в цих об'єктивах дисторсія, яка може досягати 2%, викликає значні труднощі при їхньому використанні в апаратурі, де потрібно точно визначати координати об'єктів. Крім того, такі об'єктиви мають незначне поле зору, що зменшує інформативність ОЕС з такими об'єктивами. Існує багато патентів на оптичні схеми дзеркальних об'єктивів [82 –91]. Тому було виконано дослідження найбільш перспективного тридзеркального об'єктива без екранування з збільшеним позаосьовим щільним полем зору і виправленою дисторсією.

У якості вихідних даних задавалися: фокусна відстань об'єктива f'_o , нормована середня відстань між головним і вторинним дзеркалом і вторинним і третинним дзеркалами $d_{cp}=(|d_1|+d_2)/2f'_o$, відношення відстаней між головним і вторинним дзеркалами та вторинним і третинним дзеркалами $b=d_2/|d_1|$, величина заднього фокального відрізка S' і відношення висоти першого параксіального променя на вторинному дзеркалі до висоти на головному дзеркалі $g=h_2/h_1$. Положення апертурної діафрагми було обрано на другому дзеркалі (рис. 3.1).

Усі три дзеркала розташовані на одній оптичній осі, але через велике позаосьове поле зору головне і третє дзеркала працюють позаосьовими сегментами (рис. 3.1). Це означає, що ці дзеркала стають позаосьовими при їхньому виготовленні.

Для розрахунків кутів падіння α_i першого нульового променя (рис.3.2) використовуємо формулу [92] $\alpha_{i+1} = \frac{h_i - h_{i+1}}{d_i}$ і умови нормування: $\alpha_1=0$, $h_1=1$, $\alpha_4=1$.

За цих умов нормування висоти на другому і третьому дзеркалах дорівнюють: $h_2 = g$; $h_3 = -S'$.

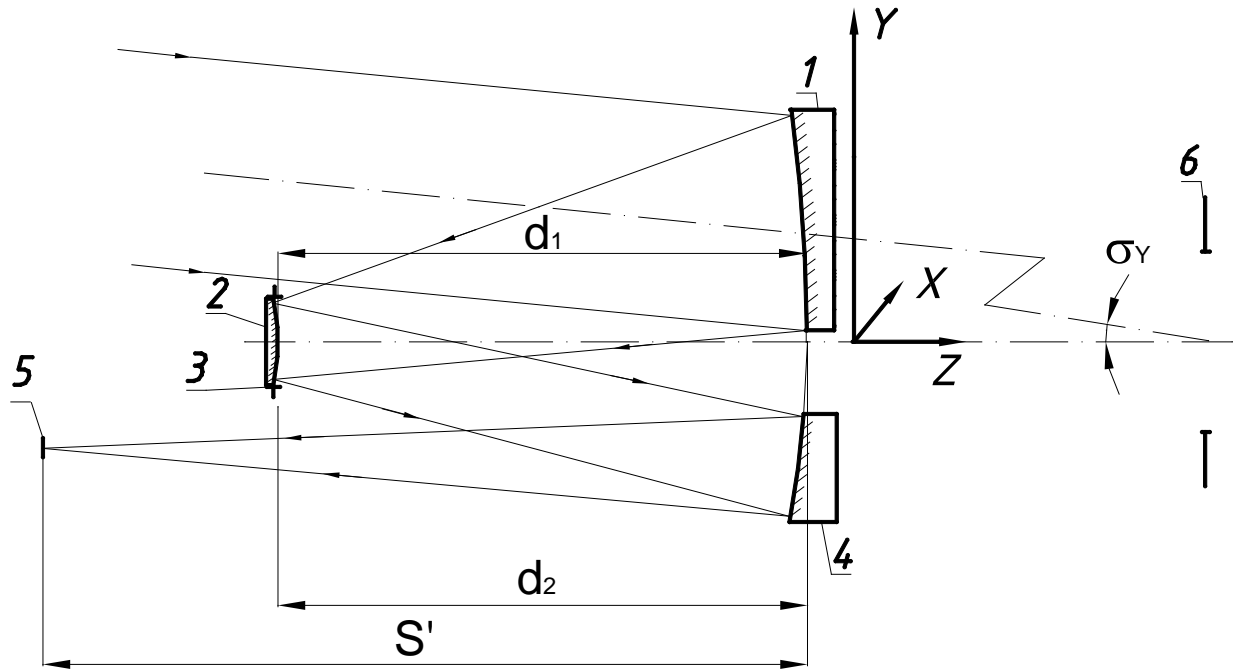


Рис. 3.1. Оптична схема тридзеркального об'єктива без екранування [93]:

1 – головне дзеркало; 2 – вторинне дзеркало; 3 – апертурна діафрагма;

4 – третинне дзеркало; 5 – фокальна площина; 6 – вхідна зіниця

Оптичні сили дзеркал обчислимо за формулою:

$$\varphi_i = \frac{\alpha_{i+1} n_{i+1} - \alpha_i n_i}{h_i}, \quad (3.1)$$

а радіуси дзеркал – за формулою

$$R_i = \frac{f'_O (n_{i+1} - n_i)}{\varphi_i}. \quad (3.2)$$

Для розрахунків кутів падіння β_i і висот на дзеркалах y_i другого параксіального променя (рис. 3.3) використовуємо формули:

$$\beta_1 = l; \quad y_1 = -S_p;$$

$$\beta_2 = -(\beta_1 + y_1 \varphi_1); \quad y_2 = 0;$$

$$\beta_3 = -(\beta_2 + y_2 \varphi_2); \quad y_3 = -(y_2 - d_2 \beta_3),$$

де $SP = d_1 / (\varphi_1 d_{1-1})$ – відстань від головного дзеркала до вхідної зіниці.

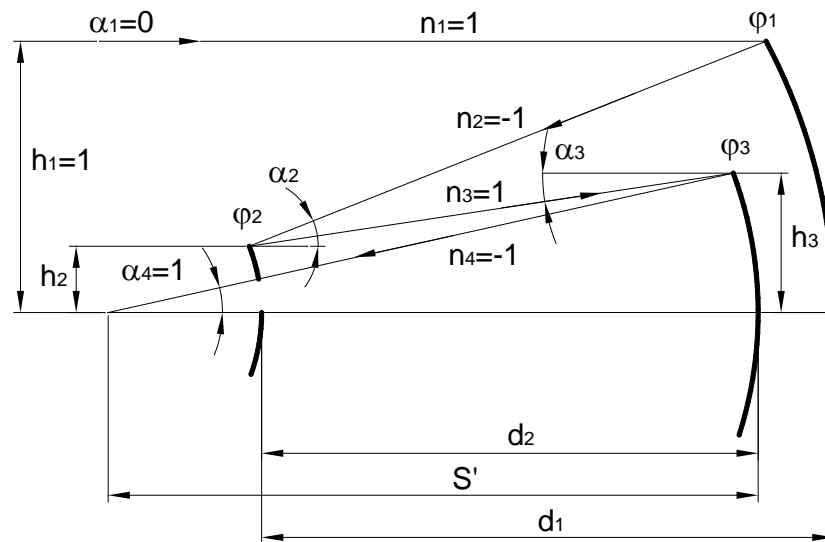


Рис. 3.2. Хід першого нульового проміння

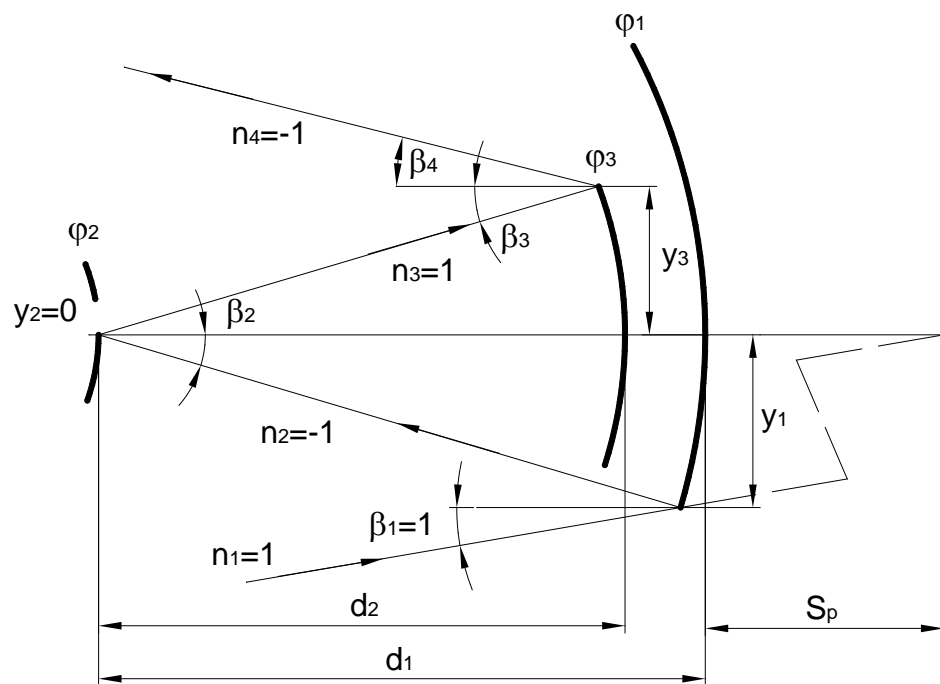


Рис. 3.3. Хід другого нульового проміння

Для отриманого в такий спосіб об'єктива розрахуємо параметри P_i і W_i сферичних дзеркал [92]:

$$P_i = \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{2} \right)^2 (\alpha_{i+1} + \alpha_i); \quad (3.3)$$

$$W_i = \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{2} \right) (\alpha_{i+1} + \alpha_i). \quad (3.4)$$

Суми Зейделя для тридзеркального об'єктива зі сферичними дзеркалами дорівнюють:

$$S_{IS} = P_1 + gP_2 - S'P_3;$$

$$S_{IIS} = y_1P_1 + W_1 + W_2 + y_3P_3 + W_3;$$

$$S_{IIIS} = y_1^2P_1 + 2y_1W_1 - \frac{y_3^2}{S'}P_3 - 2\frac{y_3}{S'}W_3 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3;$$

$$S_{IVS} = \alpha_2 - \frac{\alpha_3 + \alpha_2}{g} + \frac{1 + \alpha_3}{S'};$$

$$S_{VVS} = y_1^3P_1 + 3y_1^2W_1 + 2y_1\varphi_1 + \frac{y_3^3}{S'^2}P_3 + 3\frac{y_3^2}{S'^2}W_3 - 2\frac{y_3}{S'}\varphi_3.$$

Вплив асферичних поверхонь на аберації 3-го порядку можуть бути враховані додаванням до коефіцієнтів 3-го порядку наступних членів, які залежать від ексцентриситетів асферичних поверхонь [92]:

$$\Delta S_{IA_i} = -e_i^2 h_i \frac{(n_{i+1}\alpha_{i+1})^3}{(n_{i+1} - n_i)^2}; \quad \Delta S_{IIA_i} = \frac{y_i}{h_i} \Delta S_{IA_i};$$

$$\Delta S_{IIIA_i} = \frac{y_i}{h_i} \Delta S_{IIA_i}; \quad \Delta S_{IVA_i} = \frac{y_i}{h_i} \Delta S_{IIIA_i},$$

Де e_i^2 – квадрат ексцентриситету асферичної поверхні.

Суми Зейделя для об'єктива з асферичними поверхнями визначаються по формулах:

$$S_I = S_{IS} + \Delta S_{IA_1} + \Delta S_{IA_2} + \Delta S_{IA_3};$$

$$S_{II} = S_{IIS} + \Delta S_{IIA_1} + \Delta S_{IIA_3};$$

$$S_{III} = S_{IIIS} + \Delta S_{IIIA_1} + \Delta S_{IIIA_3};$$

$$S_{IV} = S_{IVS};$$

$$S_V = S_{VVS} + \Delta S_{VA_1} + \Delta S_{VA_3}.$$

За допомогою трьох асферичних дзеркал можна виправити сферичну аберацію, кому й астигматизм, для чого необхідно, щоб $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$. Для

виконання цієї умови необхідно, щоб аберації, внесені асферичними поверхнями, компенсували відповідні аберації тридзеркального об'єктива зі сферичними поверхнями, тобто щоб виконувалися умови:

$$-S_{IS} = \Delta S_{IA_1} + \Delta S_{IA_2} + \Delta S_{IA_3};$$

$$-S_{IIS} = \Delta S_{IIA_1} + \Delta S_{IIA_3};$$

$$-S_{IIIS} = \Delta S_{IIIA_1} + \Delta S_{IIIA_3}.$$

Розв'язавши систему цих рівнянь, можна знайти значення квадратів ексцентриситетів відповідних дзеркал, при яких в об'єктиві будуть виправлені сферична аберація, кома й астигматизм.

Для заданих значень нормованої середньої відстані d_{cp} і відношення відстаней між дзеркалами b визначалася величина заднього фокального відрізка S' і відношення висот g , при яких в об'єктиві крім сферичної аберації, коми й астигматизму були б виправлені ще і кривизна поля й дисторсія. Для цього необхідно, щоб усі суми Зейделя повинні дорівнювати нулю

$$S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0.$$

Проведений аналіз отриманих об'єктивів дозволив виявити певні закономірності значень конструктивних параметрів тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктива із позаосьовим полем зору. Ключову роль в одержанні такого об'єктива відіграють значення оптичної сили третього дзеркала φ_3 і заднього відрізка S' залежно від значень нормованої середньої відстані d_{cp} . Залежність оптичної сили третього дзеркала φ_3 від нормованої середньої відстані між дзеркалами d_{cp} для різних значень b можна знайти за формулою [93]

$$R_3 = -(0,99...1,01) \frac{2f'_o}{41,9d_{cp}^4 - 81,8d_{cp}^3 + 55,1d_{cp}^2 - 15,45d_{cp} + 3,6 + \frac{0,1^b}{b} + 0,3(1-b)}.$$

(3.5)

Для виправлення в об'єктиві кривизни поля і дисторсії задній відрізок повинен відповідати залежності, наведеній на рис. 3.4, яка може бути описана формулою

$$|S'/d_{cp}| \approx 81d_{cp}^4 - 189,5d_{cp}^3 + 169,3d_{cp}^2 - 69,5d_{cp} + 12,38 - 0,6d_{cp}(1-b). \quad (3.6)$$

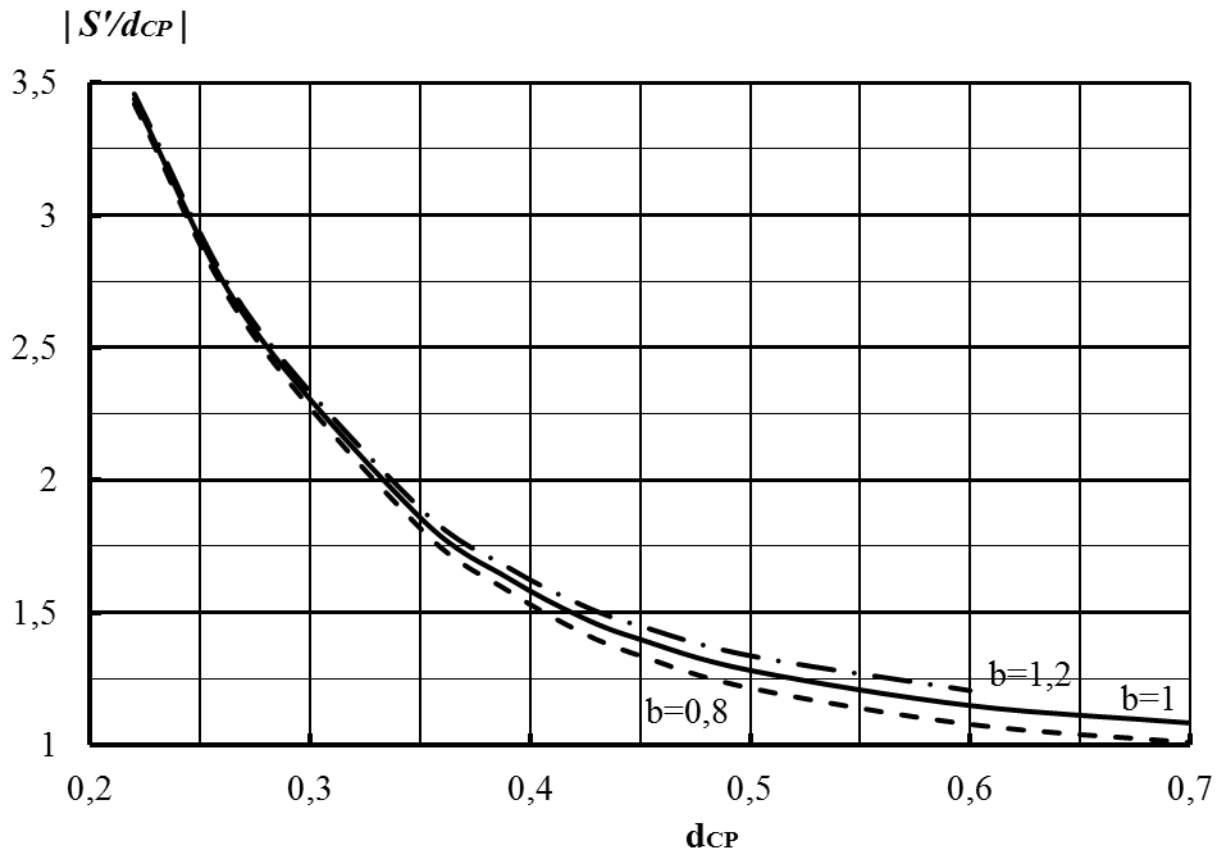


Рис. 3.4. Залежність заднього відрізка від нормованої середньої відстані між дзеркалами d_{cp}

При нормованій середній відстані $d_{cp} < 0,32$ відношення заднього відрізка до середньої відстані між дзеркалами $|S'/d_{cp}| > 2$, що дозволяє за допомогою додаткового плоского дзеркала, розташованого поблизу другого дзеркала, відхилити промені так, щоб фокальна площина перебувала за третім дзеркалом. Це дозволяє значно зменшити загальні габарити об'єктива.

Дуже часто в об'єктивах потрібно мати телецентричний хід головних променів у просторі зображень. Залежність положення вихідної зіниці S'_p об'єктива від нормованої середньої відстані між дзеркалами d_{cp} описується формулою [94]

$$S'_{p'} \approx -24,5d_{cp}^4 + 61,5d_{cp}^3 - 51,3d_{cp}^2 + 13,6d_{cp} - 0,25^{(2-b)}. \quad (3.8)$$

Телецентричний хід променів у просторі зображень залежно від відношення відстаней між дзеркалами b утворюється в об'єктиві при значеннях нормованої середньої відстані $0,45 \leq d_{cp} \leq 0,49$.

Оптичні сили дзеркал можна обчислити по наступним формулам [95]

$$\begin{cases} \varphi_1 = -\frac{2f'_o}{R_1} = \frac{(\varphi_3 \cdot S' + 1)d_2 - S' - 1}{d_1}; \\ \varphi_2 = -\frac{2f'_o}{R_2} = -\frac{\varphi_1 - \varphi_3 \cdot S' - 1}{(\varphi_3 \cdot S' + 1)d_2 - S'}; \\ \varphi_3 = -\frac{2f'_o}{R_3}. \end{cases} \quad (3.9)$$

Виготовлення позаосьових асферичних дзеркал, їх контроль і юстування тридзеркального об'єктива із позаосьовим полем зору являє собою складне технологічне завдання. Тому, з погляду спрощення конструкції, виникає цікава задача встановлення залежності кінчної постійної k дзеркал від обраних габаритів об'єктива. Для третього дзеркала при середній відстані між дзеркалами $d_{cp} < 0,29$ воно повинне бути гіперболічним, при $0,29 < d_{cp} < 0,42$ - еліптичним, а при $d_{cp} > 0,43$ воно здобуває форму сплюсненого сфероїда. Для діапазону середньої відстані між дзеркалами $0,42 < d_{cp} < 0,43$ третє дзеркало стає сферичним [94] (рис. 3.5), що значно полегшує виготовлення і контроль такого об'єктива. Кінчна стала k_3 третього дзеркала змінюється залежно від нормованої середньої відстані між дзеркалами за формулою

$$k_3 \approx -82,6d_{cp}^4 + 198,3d_{cp}^3 - 180,5d_{cp}^2 + 74,2d_{cp} - 11,5. \quad (3.10)$$

Вторинне дзеркало також при невеликих габаритах об'єктива при $d_{cp} < 0,4$ повинне бути гіперболічним, при $0,43 < d_{cp} < 0,55$ - еліптичним, а при $d_{cp} > 0,6$ воно здобуває форму сплюсненого сфероїда. Сферичним друге дзеркало може бути при середній відстані між дзеркалами $0,56 < d_{cp} < 0,60$.

Крива залежності конічної сталої другого дзеркала від габаритів може бути досить точно описана рівнянням

$$k_2 \approx -4,16 \left[1 + 5(b-1)^3 \right] d_{CP}^2 + 10,4d_{CP} - 4,59. \quad (3.11)$$

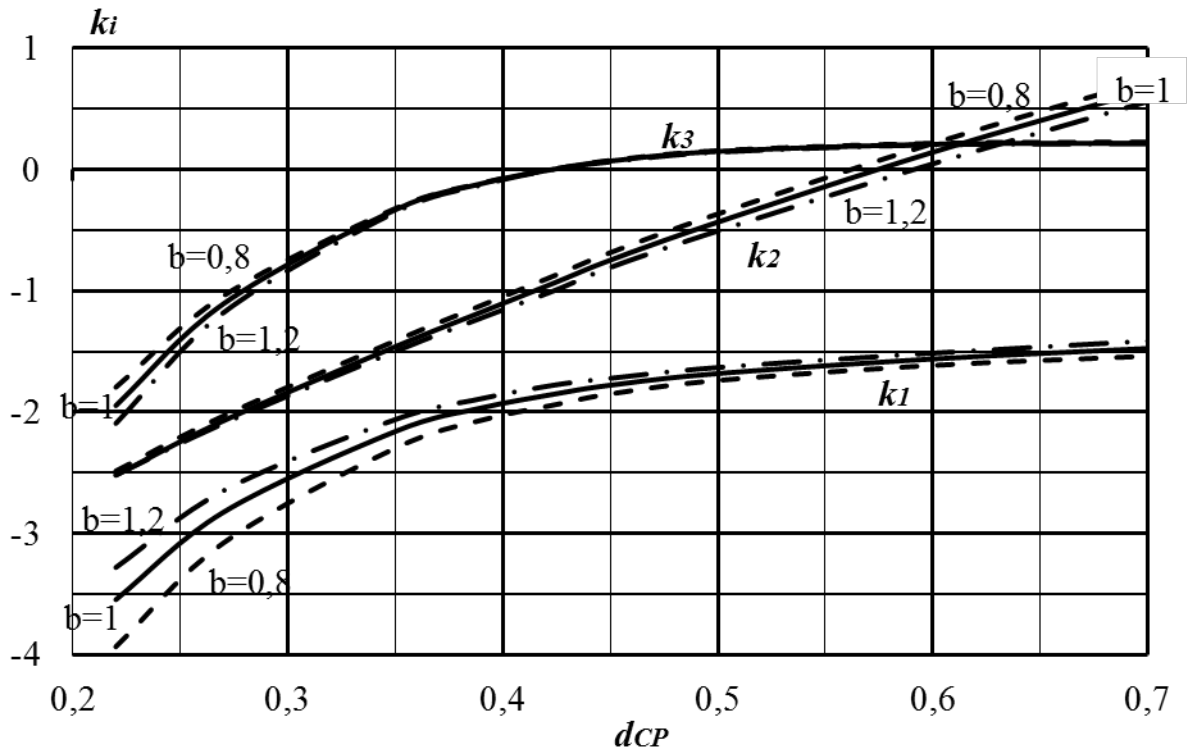


Рис. 3.5. Залежність конічних сталих дзеркал від нормованої середньої відстані між дзеркалами d_{CP}

Головне дзеркало при будь-яких габаритах об'єктива повинне мати гіперболічну форму. Конічна стала головного дзеркала змінюється залежно від середньої відстані між дзеркалами за формулою

$$k_1 \approx -76,9d_{CP}^4 + 179,9d_{CP}^3 - 159,3d_{CP}^2 + 64,3d_{CP} - 11,7. \quad (3.12)$$

Результати дослідження дозволяють спростити методику розрахунків тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктива із збільшеним позаосьовим полем зору, тому що при обраних допустимих габаритах d_{CP} і b по формулам, що наведені вище, можна визначити значення конструктивних параметрів R_3 , S' , k_1 , k_2 , k_3 , при яких будуть виправлені усі аберації.

Розрахована по запропонованому методу оптична схема тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктиву наведена на рис. 3.6.

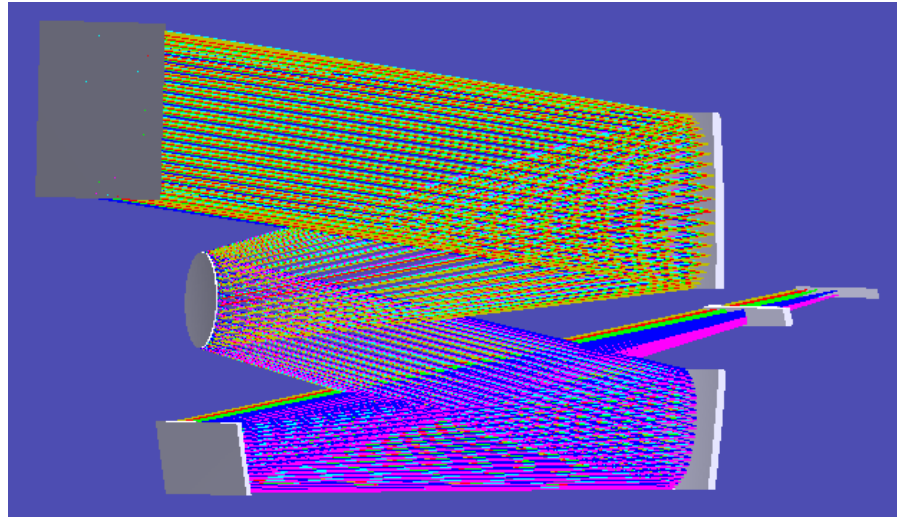


Рис. 3.6. Оптична схема тридзеркального об'єктива

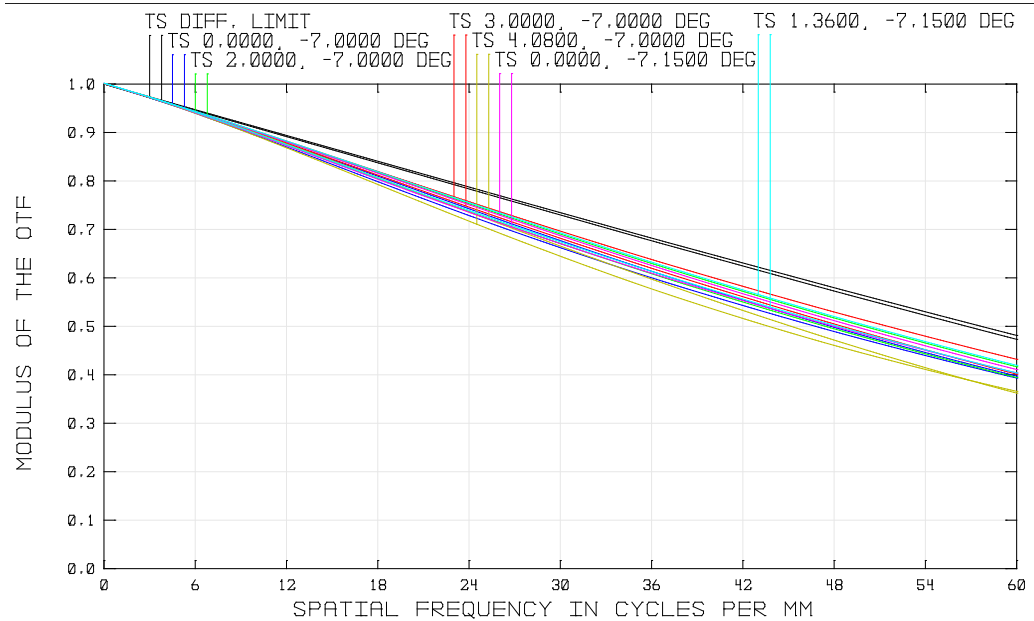


Рис. 3.7. МПФ тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктива

На рис. 3.7 представлено МПФ об'єктива в порівнянні з дифракційною МПФ безабераційного об'єктиву, а на рис. 3.8 – криву дисторсійних викривлень та астигматизму по полю зору.

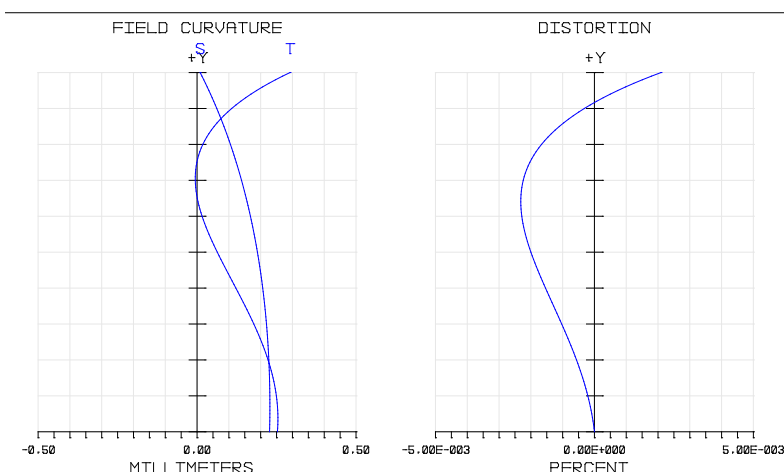


Рис. 3.8. Астигматизм та дисторсія об'єктива

3.2 Метод проектування тридзеркального вісесиметричного об'єктива з виправленою дисторсією

Серед відомих оптичних систем ДЗЗ, а особливо систем надвисокої роздільної здатності, найчастіше використовується довгофокусний тридзеркальний анастигматичний об'єктив Корша. Він використовується на космічних апаратах (КА) ДЗЗ “Pleiades” [93], “WorldView-2” [86], “Kompsat-3” [95] та інших. Серед усіх довгофокусних об'єктивів він забезпечує найменші габарити, а значить і вагу, що є одним із найважливіших критеріїв при виборі схеми об'єктива для застосування в ОЕС ДЗЗ надвисокої роздільної здатності. Особливістю систем дистанційного зондування надвисокої роздільної здатності є застосування системи сканування “Push-broom”, тобто сканування поверхні Землі ПЗЗ-лінійкою за рахунок руху космічного апарату. Тому об'єктиви в таких системах працюють щілинним полем зору.

Класична схема тридзеркального анастигматичного об'єктива Корша, яка представлена на рис. 3.9, складається з головного ввігнутого еліптичного дзеркала 1, другого гіперболічного опуклого дзеркала 2 і третього еліптичного ввігнутого дзеркала 3. Перше та друге дзеркала утворюють об'єктив Кассегрена, який створює дійсне зображення за першим дзеркалом. Третє дзеркало формує це зображення зі збільшенням в фокальній площині всього об'єктива і корегує аберації об'єктива Кассегрена. За площиною

проміжного зображення в площині вихідної зіниці тридзеркального об'єктива під кутом 45° розташовано плоске дзеркало 4, яке розділяє випромінювання, що іде від другого дзеркала до третього, від випромінювання, що іде від третього дзеркала до фокальної площини об'єктива. Розділення випромінювання можливо за рахунок роботи об'єктива щілинним полем зору, яке знаходиться під невеликим кутом до оптичної осі [96]. Допоміжне плоске дзеркало 4 дозволяє скоротити габарити об'єктива.

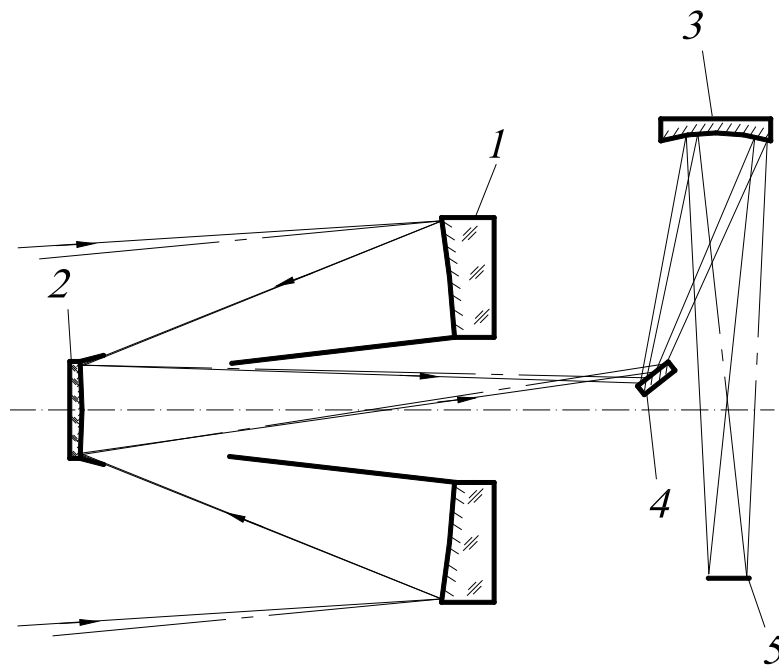


Рис. 3.9. Анастигматичний об'єктив Корша.

Основною перевагою об'єктива Корша є те, що завдяки своїй конструкції об'єктив має набагато меншу довжину при дифракційній якості зображення в порівнянні з іншими типами об'єктивів. В порівнянні з дзеркальними і дзеркально-лінзовими вісесиметричними системами схема об'єктива з проміжним зображенням має ряд переваг: покращується захист фокальної площини від стороннього потрапляння світла і з'являється можливість збільшення поля зору. Еквівалентна фокусна відстань усієї системи дорівнює добутку фокусної відстані об'єктива Кассегрена на збільшення, з яким третє дзеркало переносить зображення з площини проміжного зображення в фокальну площину всього об'єктива, що дозволяє

значно зменшити фокусну відстань дзеркального об'єктива Кассегрена, а отже і його довжину. Недоліком даної системи і всіх тридзеркальних об'єктивів з щільним полем зору є те, що за допомогою трьох асферичних дзеркал звичайно вдається виправити тільки чотири аберації: сферичну аберацію, кому, астигматизм і кривизну поля зору. Присутня в даних об'єктивах дисторсія, що досягає 2%, викликає труднощі щодо їхнього застосування в апаратурі дистанційного зондування Землі, в яких потрібно одержання якісного зображення без спотворення. Крім того, для зменшення габаритів, третє позаосьове дзеркало розташовують під кутом 90° до оптичної осі першого і другого дзеркал, що значно ускладнює юстування всього об'єктива.

Метою дослідження було усунути ці недоліки і визначити залежність конструктивних параметрів об'єктива для отримання вісесиметричної схеми тридзеркального об'єктива з усіма виправленими абераціями, у тому числі і дисторсією.

У тридзеркального об'єктива існує дев'ять конструктивних параметрів (три радіуса дзеркал, три кіничні сталі дзеркал, відстань між головним і другим дзеркалами, відстань між другим і третім дзеркалами і відстань від третього дзеркала до фокальної площини), за допомогою яких можна керувати отриманням потрібної фокусної відстані об'єктива і корегування аберацій. Для дослідження області рішень об'єктива і розрахунку сум Зейделя для аберацій третього порядку було розглянуто хід першого (рис. 3.10) і другого (рис. 3.11) нульових променів в об'єктиві Корша.

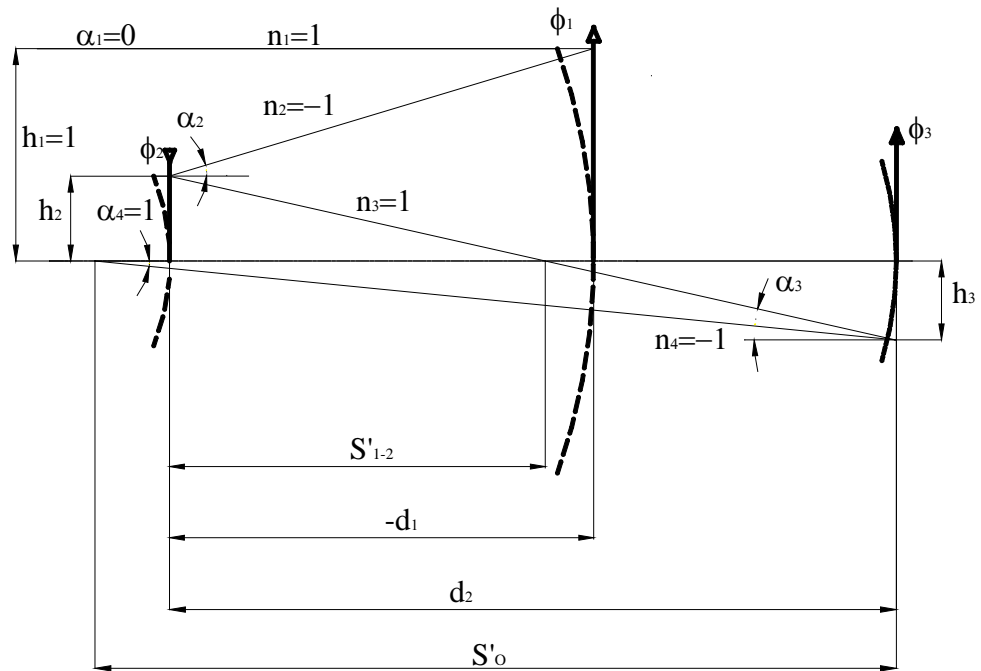


Рис. 3.10. Хід першого нульового проміння в об'єктиві Корша.

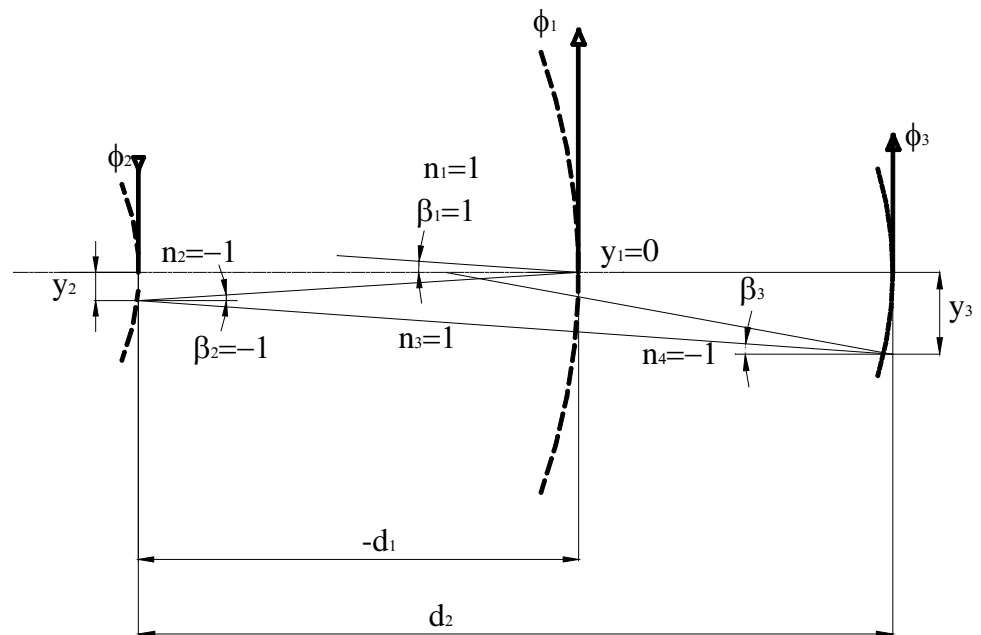


Рис. 3.11. Хід другого нульового проміння в об'єктиві Корша

Вихідними даними для габаритного розрахунку об'єктива є: фокусна відстань об'єктива f'_o (від'ємне значення); коефіцієнт екранування K (відношення висоти першого нульового проміння на другому дзеркалі до висоти на головному дзеркалі); відстань між головним і другим дзеркалами d_1 ; відстань між другим і третім дзеркалами d_2 ; положення площини проміжного зображення S'_{1-2} , яка задається коефіцієнтом a по відношенню до

відстані d_1 і положення фокальної площини об'єктива S'_o . Положення апертурної діафрагми було обрано на головному дзеркалі.

Для розрахунку кутів падіння першого α_i і висот падіння h_i нульового проміння на оптичні елементи використаємо наступні формули:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = 0; \quad h_1 = 1; \quad h_2 = K \cdot h_1; \quad \alpha_2 = \frac{h_2 - h_1}{d_1}; \quad \alpha_3 = \frac{h_2}{S'_{1-2}}; \\ S'_{1-2} = a \cdot d_1; \quad h_3 = \alpha_3 (S'_{1-2} - d_2); \quad \alpha_4 = 1; \quad S'_o = \alpha_4 \cdot h_3. \end{aligned}$$

Знайдемо оптичні сили компонентів об'єктива і радіуси сферичних поверхонь дзеркал:

$$\begin{aligned} \varphi_1 = \frac{\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{n_2} - \frac{n_1}{h_1}}{h_1}; \quad \varphi_2 = \frac{\frac{\alpha_3 - \alpha_2}{n_3} - \frac{n_2}{h_2}}{h_2}; \quad \varphi_3 = \frac{\frac{\alpha_4 - \alpha_3}{n_4} - \frac{n_3}{h_3}}{h_3}; \\ R_1 = \frac{2f'_o \cdot n_2}{\varphi_1}; \quad R_2 = \frac{2f'_o \cdot n_3}{\varphi_2}; \quad R_3 = \frac{2f'_o \cdot n_4}{\varphi_3}. \end{aligned}$$

Для розрахунку ходу другого нульового проміння введемо умови нормування. Кут падіння другого нульового проміння на головне дзеркало дорівнює $\beta_1 = 1$, а висота падіння $y_1 = 0$, так як апертурна діафрагма розташована на головному дзеркалі. Для розрахунку кутів падіння β_i і висот падіння на компонентах y_i другого нульового проміння застосуємо наступні формули:

$$\begin{aligned} \beta_1 = 1; \quad y_1 = 0; \\ \beta_2 = -(\beta_1 + y_1 \cdot \varphi_1) = -\beta_1; \quad y_2 = y_1 - d_1 \cdot \operatorname{tg} \beta_2 = -d_1 \cdot \operatorname{tg} \beta_2; \\ \beta_3 = (-\beta_2 + y_2 \cdot \varphi_2); \quad y_3 = y_2 - d_3 \cdot \operatorname{tg} \beta_3. \end{aligned}$$

Так як оптичні сили дзеркал φ_1 , φ_2 і φ_3 визначені, то визначимо параметри P_i і W_i сферичних дзеркал [92]:

$$P_i = \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{2} \right)^2 (\alpha_{i+1} + \alpha_i); \quad (3.13)$$

$$W_i = \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{2} \right) (\alpha_{i+1} + \alpha_i). \quad (3.14)$$

Знаючи висоти на дзеркалах двох нульових променів і параметри P і W цих компонентів, проведемо розрахунок сум Зейделя для об'єктива з сферичними дзеркалами в області аберацій третього порядку:

$$S_{Ic\phi} = h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_3 P_3;$$

$$S_{IIc\phi} = y_1 P_1 + W_1 + y_2 P_2 + W_2 + y_3 P_3 + W_3;$$

$$S_{IIIc\phi} = \frac{y_1^2}{h_1} P_1 + 2 \frac{y_1}{h_1} W_1 + f_1 + \frac{y_2^2}{h_2} P_2 + 2 \frac{y_2}{h_2} W_2 + f_2 + \frac{y_3^2}{h_3} P_3 + 2 \frac{y_3}{h_3} W_3 + f_3;$$

$$S_{IVc\phi} = \frac{n_2 \alpha_2 - n_1 \alpha_1}{h_1 n_2 n_1} + \frac{n_3 \alpha_3 - n_2 \alpha_2}{h_2 n_3 n_2} + \frac{n_4 \alpha_4 - n_3 \alpha_3}{h_3 n_4 n_3};$$

$$S_{Vc\phi} = \frac{y_1^3}{h_1^2} P_1 + 3 \frac{y_1^2}{h_1^2} W_1 + 2 \frac{y_1}{h_1} f_1 + \frac{y_2^3}{h_2^2} P_2 + 3 \frac{y_2^2}{h_2^2} W_2 + 2 \frac{y_2}{h_2} f_2 + \frac{y_3^3}{h_3^2} P_3 + 3 \frac{y_3^2}{h_3^2} W_3 + 2 \frac{y_3}{h_3} f_3.$$

Вплив асферизації поверхонь дзеркал на аберації третього порядку можна виразити додаванням до коефіцієнтів третього порядку наступних членів, які залежать від кінічних сталих деформованих поверхонь:

– для головного дзеркала:

$$\Delta S_{IA1} = k_1 h_1 \frac{(n_2 \alpha_2 - n_1 \alpha_1)^3}{(n_2 - n_1)^2}; \quad \Delta S_{IIA1} = \frac{y_1}{h_1} \Delta S_{IA1} = 0;$$

$$\Delta S_{IIIA1} = \frac{y_1}{h_1} \Delta S_{IIA1} = 0; \quad \Delta S_{VA1} = \frac{y_1}{h_1} \Delta S_{IIIA1} = 0;$$

– для другого дзеркала:

$$\Delta S_{IA2} = k_2 h_2 \frac{(n_3 \alpha_3 - n_2 \alpha_2)^3}{(n_3 - n_2)^2}; \quad \Delta S_{IIA2} = \frac{y_2}{h_2} \Delta S_{IA2};$$

$$\Delta S_{IIIA2} = \frac{y_2}{h_2} \Delta S_{IIA2};$$

$$\Delta S_{VA2} = \frac{y_2}{h_2} \Delta S_{IIIA2}.$$

– для третього дзеркала:

$$\Delta S_{IA3} = k_3 h_3 \frac{(n_4 \alpha_4 - n_3 \alpha_3)^3}{(n_4 - n_3)^2}; \quad \Delta S_{IIA3} = \frac{y_3}{h_3} \Delta S_{IA3}; \quad \Delta S_{IIIA3} = \frac{y_3}{h_3} \Delta S_{IIA3};$$

$$\Delta S_{VA3} = \frac{y_3}{h_3} \Delta S_{IIIA3}.$$

З урахуванням аберацій об'єктива з сферичними дзеркалами і додатка, що вносить асферизація дзеркал, суми Зейделя для об'єктива з асферичними дзеркалами дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} S_I &= S_{Ic\phi} + \Delta S_{IA1} + \Delta S_{IA2} + \Delta S_{IA3}; \\ S_{II} &= S_{IIc\phi} + \Delta S_{IIA1} + \Delta S_{IIA2} + \Delta S_{IIA3}; \\ S_{III} &= S_{IIIc\phi} + \Delta S_{IIIA1} + \Delta S_{IIIA2} + \Delta S_{IIIA3}; \\ S_{IV} &= \left(\frac{n_2 \alpha_2 - n_1 \alpha_1}{h_1 n_2 n_1} \right) + \left(\frac{n_3 \alpha_3 - n_2 \alpha_2}{h_2 n_3 n_2} \right) + \left(\frac{n_4 \alpha_4 - n_3 \alpha_{31}}{h_3 n_4 n_3} \right); \\ S_V &= S_{Vc\phi} + \Delta S_{VA1} + \Delta S_{VA2} + \Delta S_{VA3}. \end{aligned} \right\}$$

За допомогою трьох асферичних поверхонь можна виправити сферичну аберацію, кому і астигматизм, для чого необхідно, щоб $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$. Для виконання цієї умови необхідно, щоб

$$\left. \begin{aligned} -S_{Ic\phi} &= \Delta S_{IA1} + \Delta S_{IA2} + \Delta S_{IA3}; \\ -S_{IIc\phi} &= \Delta S_{IIA2} + \Delta S_{IIA3}; \\ -S_{IIIc\phi} &= \Delta S_{IIIA2} + \Delta S_{IIIA3}. \end{aligned} \right\}$$

З розв'язку системи рівняння можна знайти значення кінічних сталих k_1 , k_2 і k_3 головного, другого і третього дзеркал, при яких в об'єктиві буде виправлена сферична аберація, кома і астигматизм. При визначених умовах в об'єктиві може бути виправлена не тільки кривизна поля зору ($S_4=0$), але і дисторсія ($S_5=0$) [97]. Для різних відстаней між дзеркалами d_1 , d_2 , знаходили таку відстань від другого дзеркала до площини проміжного зображення S'_{1-2} і коефіцієнт екранування K , при яких були виправлені кривизна поля зору ($S_4=0$) і дисторсія ($S_5=0$).

Запропонований об'єктив, як і об'єктив Корша, складається з головного ввігнутого дзеркала 1 (рис. 3.12), другого опуклого дзеркала 2 і ввігнутого

третього дзеркала 3. Дзеркала 1 і 2 утворюють дзеркальний об'єктив Кассегрена з фокусною відстанню f'_K , яка створює проміжне зображення на відстані S'_K від другого дзеркала. Так як при зйомці Землі застосовують систему сканування "Push-broom" з щілинним полем зору, то в площині проміжного зображення утворюється зображення у вигляді смужки. В площині проміжного зображення встановлюється допоміжне дзеркало 4 з щілинним отвором (рис. 3.13). Промені, які відбилися від другого дзеркала проходять через щілинний отвір в дзеркалі 4 і потрапляють на третє дзеркало 3. Дзеркало 3 працює як проєкційний об'єктив і створює зображення, яке сформовано об'єктивом Кассегрена, в фокальній площині 5 усього об'єктива на відстані S'_{ob} від плоского дзеркала 4 з збільшенням β . Для зменшення габаритів в систему може бути додатково введено відхиляюче плоске дзеркало 6, яке направить промені в фокальну площину об'єктива 5а. Плоске дзеркало 4 відхилене від оптичної осі на кут α щоб розділити випромінювання, яке іде від другого дзеркала до третього, від випромінювання, яке іде від третього дзеркала в напрямку фокальної площини. Така конструкція дозволяє розмістити всі три дзеркала на оптичній осі об'єктива, що значно спрощує виготовлення та юстування об'єктива, а також зменшити довжину об'єктива, використавши для ходу променів простір між головним дзеркалом 1 і допоміжним плоским дзеркалом 4.

Аналіз конструктивних параметрів рішень, при яких в об'єктиві виправлені усі аберації третього порядку, тобто всі п'ять сум Зейделя дорівнюють нулю ($S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0$), показав, що радіус головного дзеркала в залежності від відстанями між дзеркалами d_1 і d_2 змінюється, як показано на рис. ДД,1 Додатку Д і цю залежність можна описати формулою [98]

$$R_1 = (0,96...1,04) \left(0,24|d_{2H}| + 0,355\sqrt{\frac{d_{1H}}{0,068}} - 0,215 \right) f'_{ob}, \quad (3.15)$$

де f'_{ob} - фокусна відстань об'єктива (від'ємна величина),

$d_{1H} = \frac{d_1}{f'_{ob}}$ - нормована відстань між першим і другим дзеркалами,

$d_{2H} = \frac{d_2}{f'_{ob}}$ - нормована відстань між другим і третім дзеркалами.

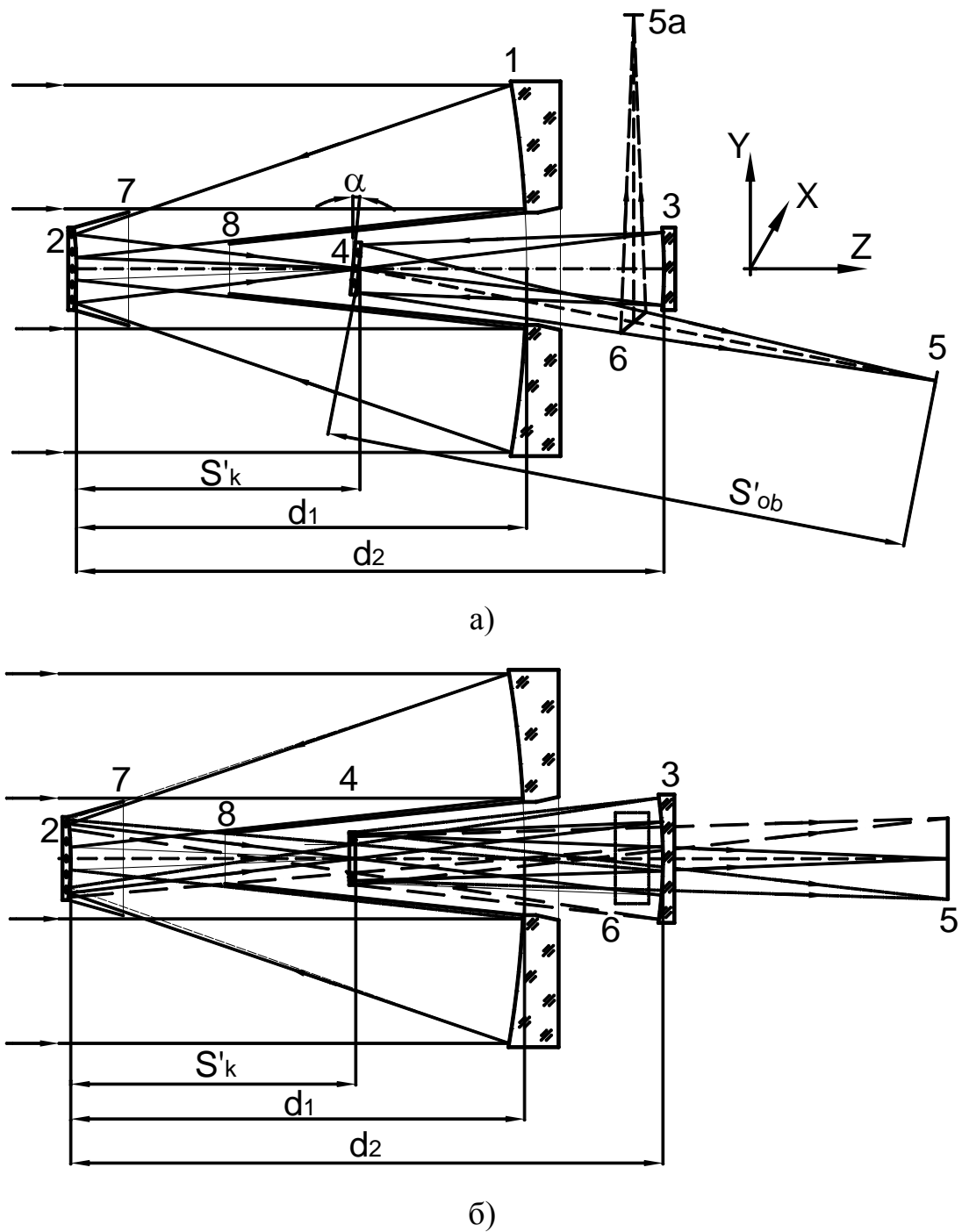


Рис. 3.13. Тридзеркальний анастигматичний вісесиметричний об'єктив з виправленою дисторсією [98]: а) вертикальний перетин об'єктива; б) горизонтальний перетин об'єктива

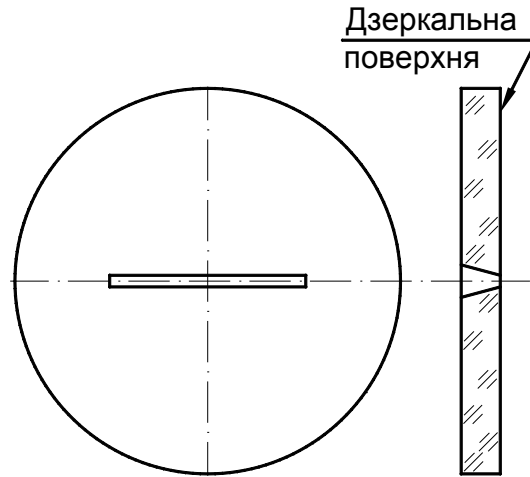


Рис. 3.13. Плоске дзеркало з щілинним отвором

Радіус другого дзеркала в залежності від відстані між дзеркалами для виправлення усіх аберацій третього порядку підпорядковується залежності, що наведена на рис. ДД,2 Додатку Д і описується формулою [99]

$$R_2 = (0,97...1,03) \left(-0,4d_{2H}^2 + 0,483\sqrt{\frac{d_{1H}}{0,084}}|d_{2H}| + 0,011 \right) f'_{ob}. \quad (3.16)$$

Залежність радіуса третього дзеркала від відстані між дзеркалами наведена на рис. ДД,3 Додатку Д і її можна описати формулою

$$R_3 = (0,97...1,03) \left(\frac{0,0213}{d_{1H}} d_{2H}^2 + 0,65\sqrt{\frac{d_{1H}}{0,087}}|d_{2H}| + 0,01 \right) f'_{ob}. \quad (3.17)$$

Для виправлення аберацій конічні сталі оптичних поверхонь дзеркал в залежності від відстані між дзеркалами повинні змінюватися так, як показано на рис. ДД,4, ДД,5 і ДД,6 Додатку Д в відповідності до формул [100]:

$$k_1 = (0,97...1,03) \left(0,173\sqrt{\frac{d_{1H}}{0,085}}|d_{2H}| - 0,994 \right); \quad (3.18)$$

$$k_2 = (0,98...1,02) \left(-6,3\sqrt{\frac{d_{1H}}{0,085}}d_{2H}^2 + 7,3\sqrt{\frac{d_{1H}}{0,085}}|d_{2H}| - 4,57\sqrt{\frac{d_{1H}}{0,085}} \right); \quad (3.19)$$

$$k_3 = (0,98...1,02) \left(-0,7d_{2H}^2 + \frac{0,88}{\sqrt[4]{\frac{d_{1H}}{0,082}}} |d_{2H}| - \frac{0,63}{\sqrt[3]{\frac{d_{1H}}{0,084}}} \right). \quad (3.20)$$

Площина проміжного зображення в об'єктиві знаходиться від другого дзеркала на відстані S'_K (рис. ДД,7 Додатку Д):

$$S'_K = -(0,97...1,03) \left(0,02d_{2H}^2 + \frac{0,44}{\sqrt[3]{\frac{d_{1H}}{0,087}}} |d_{2H}| + 0,007 \right) f'_{ob}, \quad (3.21)$$

а задній фокальний відрізок об'єктива S'_{ob} в залежності від відстані між дзеркалами повинен змінюватися, як показано на рис. ДД,8 Додатку Д, в відповідності до формули

$$S'_{ob} \approx - \left(-0,7d_{2H}^2 + 0,8|d_{2H}| + \frac{0,047}{\left(\frac{d_{1H}}{0,085}\right)^2} \right) f'_{ob}. \quad (3.22)$$

Третє дзеркало створює в фокальній площині об'єктива зображення, яке формується об'єктивом Кассегрена з збільшенням β , яке підпорядковується закону (рис. ДД,9 Додатку Д):

$$\beta = - \left(9,9d_{2H}^2 - \frac{9|d_{2H}|}{\sqrt{\frac{d_{1H}}{0,085}}} + \frac{4,18}{\sqrt{\frac{d_{1H}}{0,085}}} \right). \quad (3.23)$$

На відміну від об'єктива Корша, де третє дзеркало створює зображення з збільшенням $\beta \approx -1^\times$, в об'єктиві с виправленою дисторсією збільшення третього дзеркала повинно бути $\beta < -2^\times$ [100].

Вихідна зіниця об'єктива знаходиться на відстані S'_P від фокальної площини поблизу площини проміжного зображення

$$S'_{p'} = \left(-0,7d_{2H}^2 + \frac{0,795}{\sqrt[8]{0,085}} |d_{2H}| + \frac{0,039}{\left(\frac{d_{1H}}{0,085}\right)^{1,23}} \right) f'_{ob}. \quad (3.24)$$

Отримані в результаті дослідження емпіричних формул конструктивних параметрів тридзеркального вісесиметричного об'єктива дозволяють швидко сконструювати довгофокусний об'єктив, в якому виправлені всі п'ять аберацій третього порядку (сферична аберація, кома, астигматизм, кривизна поля зору та дисторсія). Для виправлення дисторсії збільшення третього дзеркала повинно бути $\beta < -2^\times$.

Відносний отвір об'єктива становить від 1:20 до 1:10, а поле зору в залежності від вибраних відстаней між дзеркалами від $2\omega = 1^\circ$ до $2\omega = 2,6^\circ$.

В об'єктиві всі три дзеркала вісесиметричні, що значно спрощує виготовлення і контроль дзеркал та юстування об'єктиву. Оптична довжина об'єктива може сягати $0,1f_o'$, що дозволяє створювати малогабаритні довгофокусні об'єктиви для систем дистанційного зондування Землі з надвисоким просторовим розділенням.

Розрахована по запропонованому методу оптична схема та світлина макетного зразка тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктива наведена на рис. 3.14 а) та б). На рис. 3.15 зображена МПФ цього об'єктиву, а на рис. 3.16 – його астигматизм та дисторсія.

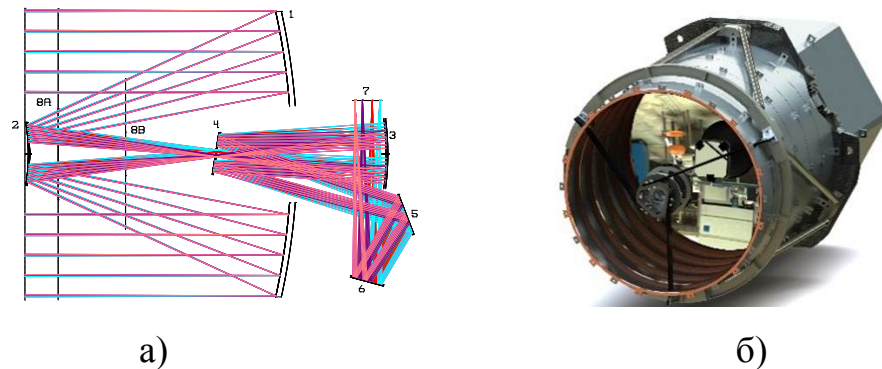


Рис. 3.14. Оптична схема та світлина тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктива

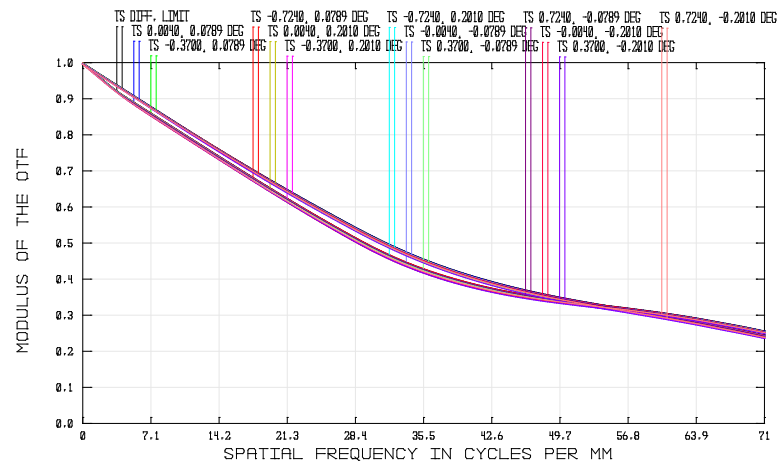


Рис. 3.15. МПФ тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктива

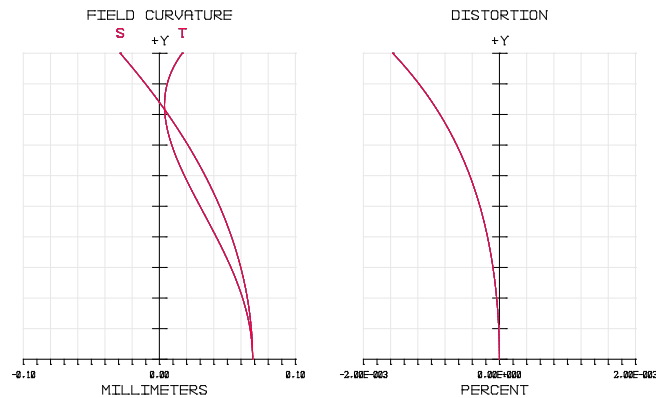


Рис. 3.16. Астигматизм та дисторсія тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктива

3.3 Оптимізація оптичної системи сканера з проєкційним об'єктивом

Основним протиріччям при побудові сканера з панхроматичним і спектральними каналами є те, що для одержання достатнього радіометричного розділення в більш вузьких спектральних каналах потрібно збільшувати величину проєкції пікселя. Для випадку застосування одного об'єктива це досягається застосуванням спеціальних ПЗЗ-лінійок з більшою величиною пікселя, а значить і можливістю збільшити час накопичення. Такі лінійки розробляють і виготовляють по спеціальному замовленню, що дуже дорого.

Другий шлях — застосування звичайних ПЗЗ-лінійок без часової затримки накопичення (ЧЗН) *TDI*, але різних об'єктивів для панхроматичного

і спектральних каналів, причому при величинах проекції пікселя на Землі $P \leq 2$ м світлосила об'єктива для спектральних каналів повинна бути не менш $F/\# \leq 6$.

Третій шлях - створення в одному сканері на базі одного основного об'єктива різних фокусних відстаней і відносних отворів для панхроматичного і спектральних каналів. Це дозволить одночасно отримувати широку смугу огляду поверхні Землі та високе розділення зображення. Третій шлях є найцікавішим з точки зору здешевлення розробки та зменшення габаритів і ваги комплексу.

В якості основного об'єктива було обрано тридзеркальний анастигматичний квазіортоскопічний об'єктив з фокусною відстанню f'_o . В фокальній площині цього об'єктиву розміщено ПЗЗ-лінійки спектральних каналів. Ще однією умовою при розрахунках – необхідність телецентричного ходу променів у просторі зображень, що забезпечить однакові кути проходження променів інтерференційних покриттів по всім полю зору і зручність узгодження зіниць в об'єктиві панхроматичного каналу. Для виконання всіх цих вимог, а також одержання мінімальних габаритів об'єктива обираємо $d_{cp} \approx 0,47 f'_o$.

Для одержання необхідної фокусної відстані в панхроматичному каналі необхідно до розробленого вище тридзеркального об'єктиву з фокусною відстанню f'_o додати проекційний об'єктив, який би переносив зображення з фокальної площини об'єктива з фокусною відстанню f'_o у фокальну площину всієї системи зі збільшенням $\beta = \frac{f'_{PAN}}{f'_o} = 2,5 \dots 4$. Для збільшення смуги огляду панхроматичного об'єктива до необхідної величини встановимо після фокальної площини головного об'єктива з фокусною відстанню f'_o два проекційні дзеркальних об'єктиви із двома ПЗЗ-лінійками, зміщених щодо оптичної осі головного об'єктива в різні сторони уздовж лінії зображення смуги земної поверхні [101].

Оптична схема об'єктива високої роздільної здатності з збільшеною смугою огляду приведена на рис. 3.17, а МПФ об'єктива панхроматичного каналу – на рис. 3.18.

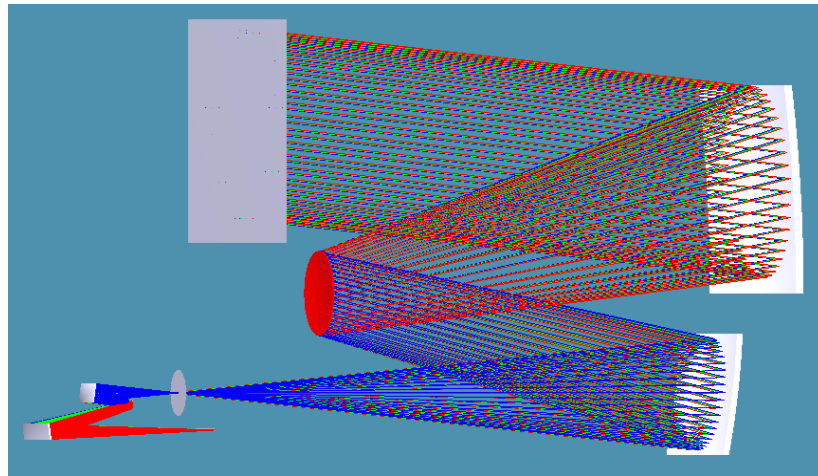


Рис. 3.17. Оптична схема об'єктива високої роздільної здатності з проекційним об'єктивом

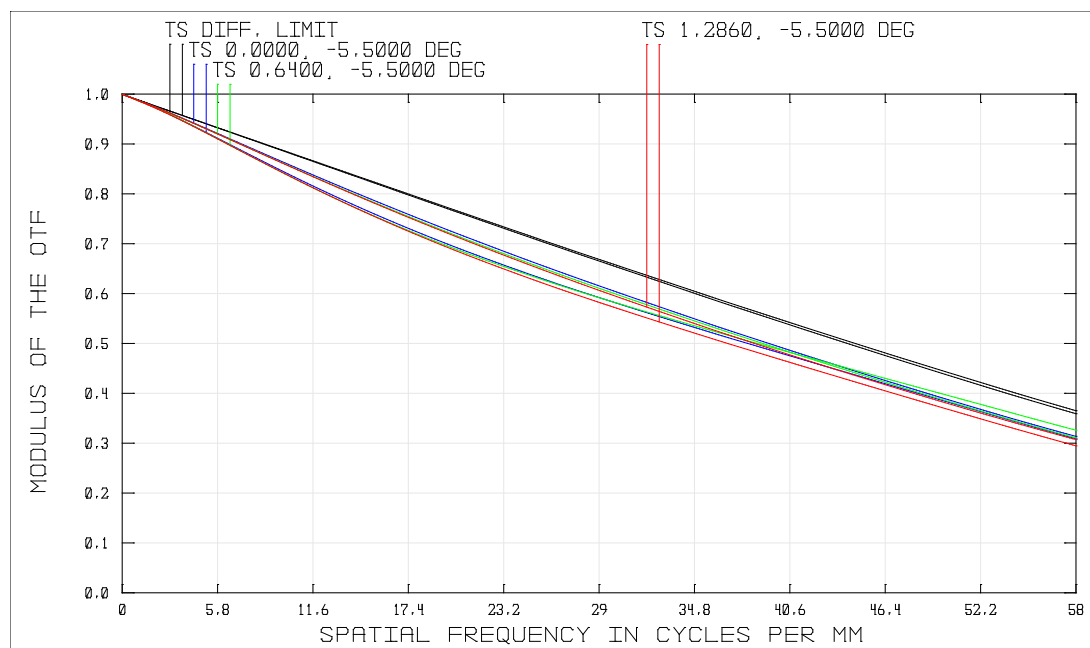


Рис. 3.18. МПФ панхроматичного каналу об'єктива

Така схема побудови об'єктива дозволяє в одному сканері отримати декілька спектральних діапазонів з просторовим розділенням 3...5 м та панхроматичний канал з просторовим розділенням менше 1 м з якістю зображення близькою до дифракційної межі.

Висновки до розділу 3

Запропоновано абераційні моделі нових оптичних систем сканерів ДЗЗ високого та надвисокого просторового розділення, що дало можливість дослідити їх оптичні системи об'єтивів і отримати такі результати:

1. Розроблено метод проектування тридзеркального квазіортоскопічного об'єктиву з позаосьовим полем зору, в результаті дослідження якого:

1.1. Отримано нові формули залежності конструктивних параметрів об'єктива від відстаней між дзеркалами для виправлення в об'єктиві п'ятих аберацій третього порядку.

1.2. Для діапазону середньої відстані між дзеркалами $0,42 < d_{cp} < 0,43$ третє дзеркало стає сферичним, що значно полегшує виготовлення і контроль такого об'єктива. Друге дзеркало може бути сферичним при середній відстані між дзеркалами $0,56 < d_{cp} < 0,60$. Телецентричний хід променів у просторі зображень залежно від відношення відстаней між дзеркалами утворюється в об'єктиві при значеннях нормованої середньої відстані $0,45 \leq d_{cp} \leq 0,49$.

2. Розроблено метод проектування тридзеркального вісесиметричного об'єктиву з виправленою дисторсією, в результаті дослідження якого:

2.1. Отримано формули залежності конструктивних параметрів об'єктива від відстаней між дзеркалами для виправлення в об'єктиві п'ятих аберацій третього порядку. Для виправлення дисторсії збільшення третього дзеркала повинно бути меншим -2^\times .

2.2. Запропоновано нову схему об'єктива, оптична довжина якого може становити $0,1f'_o$, що дозволяє створити малогабаритні довгофокусні об'єктиви для систем ДЗЗ з високою просторовою роздільною здатністю.

3. Проведена оптимізація оптичної системи сканера з проєкційним об'єктивом, в результаті якої запропонована нова система з додатковим проєкційним об'єктивом, що дозволяє використовувати один тип ПЗЗ-лінійки для панхроматичного та спектральних каналів.

РОЗДІЛ 4

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ КОСМІЧНОГО БАЗУВАННЯ

Сучасні тепловізійні системи спостереження (ТПСС) знаходять широке застосування в різних галузях діяльності людини, зокрема як космічні і авіаційні системи спостереження земної поверхні [104,105]. Основними узагальненими характеристиками ТПСС є просторове і енергетичне (температурне) розділення, які об'єднуються функцією під назвою мінімальна роздільна різниця температур (MRPT). Є ряд стандартів і методів, що визначають MRPT, в яких тепловізійні зображення аналізуються спостерігачем на екрані дисплея [57,104]. Однак такий підхід неможливо застосувати до ТПСС, розташованих на супутниках або безпілотних літальних апаратах, де спостерігач і дисплей відсутні. Супутникові системи ДЗЗ ІЧ-діапазону базувались на базі охолоджуваних фотоприймачів. В останні роки отримали свій розвиток мікроболометричні матриці, які не потребують кріогенного охолодження приймача випромінювання [107]. Основним недоліком неохолоджуваних приймачів випромінювання є менша температурна чутливість в порівнянні з охолоджуваними приймачами, але вони мають і ряд суттєвих переваг [10]. Наявність в ІЧ-камері декількох спектральних каналів дозволить вирішити проблему визначення складу об'єктів земної поверхні по зміні коефіцієнтів випромінювання [107]. Причому оптимальним вважається наявність від 3 до 6 спектральних каналів [108]. Саме тому потрібно удосконалити і дослідити узагальнену фізико-математичну модель інфрачервоної системи спостереження космічного базування, в якій вплив дисплея і спостерігача на величину MRPT вилучається.

4.1 Формування зображення в тепловізійній системі космічного базування

Узагальнена модель системи «об'єкт – атмосфера – об'єктив – мікроболометрична матриця – електронний блок обробки відеосигналів» представлена на рис. 4.1. Власне випромінювання від об'єкта спостереження і фону проходить через атмосферу й надходить в оптичну систему космічного тепловізора (КТ). Оптична система (інфрачервоний об'єктив) формує зображення об'єкта і фону в площині мікроболометричної матриці (МБМ). МБМ перетворює потік випромінювання, що прийшов на МБМ, в електричний сигнал, який після підсилення надходить до пристрою аналогової й цифрової обробки і далі в радіолінію супутника.

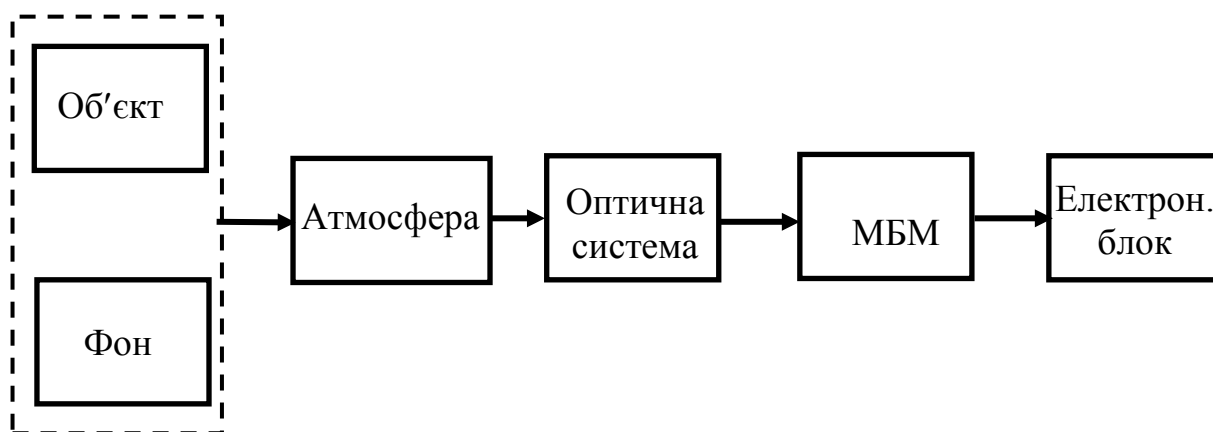


Рис. 4.1. Узагальнена модель системи «об'єкт – атмосфера – космічний тепловізор»

Всі об'єкти на поверхні Землі мають певну температуру і випромінюють власне теплове випромінювання. Вони також мають певні геометричні розміри, енергетичну яскравість і часове положення в просторі. Як правило, для об'єктів ці параметри описуються детермінованими функціями, а для фонів – випадковими [109].

Для об'єктів спостереження в якості енергетичної характеристики будемо використовувати спектральну і енергетичну світність, які визначаються розподілом температури та спектрального коефіцієнту випромінювання $\varepsilon(\lambda)$ по поверхні об'єкта. Спектральна світність визначається функцією Планка $M_\lambda(\lambda, T)$ [110]:

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) M_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{мкм}}, \quad (4.1)$$

де $c_1 = 37415 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$, $c_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ – сталі коефіцієнти; λ – довжина хвилі в мкм.

Для математичного моделювання оптико-електронної системи космічного тепловізора будемо вважати, що:

1. Об'єкт і фон – ламбертовські джерела випромінювання.
2. Об'єкт і фон – «сірі» тіла з коефіцієнтами випромінювання ε_t та ε_b .
3. Поверхня об'єкту та фону мають сталу температуру T_t та T_b , яка мало змінюється за час зйомки.

Перш ніж потрапити до вхідної зіниці об'єктива оптичної системи випромінювання від об'єкту та фону проходить атмосферу. При проходженні інфрачервоного випромінювання через земну атмосферу відбувається його ослаблення за рахунок розсіювання і поглинання молекулами водяної пари, вуглекислого газу й озону. Головним компонентом атмосфери, що поглинає інфрачервоне випромінювання, є водяна пара. Кількість водяної пари в атмосфері швидко зменшується з висотою, і зазвичай вважають, що вище 12 км кількість водяної пари достатньо мала. Інший змінний компонент атмосфери озон на рівні моря є присутнім у дуже невеликих кількостях. Кількість озону зростає з висотою (максимально на висоті близько 25 км) і знову зменшується на більших висотах. Тому поглинання випромінювання шаром озону доводиться враховувати при спостереженні Землі з космічного корабля. Головна смуга поглинання озону в інфрачервоній смузі спектру спостерігається при довжинах хвиль 9,6 мкм.

Для спрощеної моделі вважають, що для спектрального діапазону 8-14 мкм середній інтегральний коефіцієнт пропускання атмосфери при спостереженні Землі з космосу складає $\tau_A = 0,75$ [109].

Оптична система складається із двох основних компонентів – інфрачервоного об'єктива і набору спектральних фільтрів. Об'єктив призначений для формування зображення в площині приймача випромінювання з необхідним просторовим розділенням (якістю зображення) і енергетичним розділенням (світлосилою). Фільтри забезпечують роботу інфрачервоної системи спостереження у заданому спектральному діапазоні.

Для математичного моделювання об'єктива будемо використовувати наступні його основні характеристики (рис. 4.2):

- 1) Фокусна відстань f'_o ;
- 2) Діаметр вхідної зіниці D_p ;
- 3) Діафрагмове число k_{eff} ;
- 4) Кутове поле зору $2\omega_o$;
- 5) Лінійне поле зору в площині зображення (МБМ) $l_{Dx} \times l_{Dy}$ та площині предметів $V \times W$;
- 6) Модуляційна передаточна функція $M_o(\nu_x, \nu_y)$;
- 7) Роздільну здатність ν_{res} ;
- 8) Спектральні $\tau_o(\lambda)$ та інтегральні τ_o коефіцієнти пропускання об'єктиву та фільтрів $\tau_F(\lambda)$, τ_F .

Здатність об'єктива концентрувати енергію випромінювання характеризується енергетичною освітленістю E_{e0}' , яка формується на чутливій поверхні приймача випромінювання при заданій яскравості об'єкту $L_{et}(\lambda)$. Для осьової точки вісесиметричної оптичної системи спектральна освітленість визначається за формулою [57]

$$E_{e0}'(\lambda) = \frac{\pi \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) L_{et}(\lambda)}{4k_{eff}^2}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{МКМ}}. \quad (4.2)$$

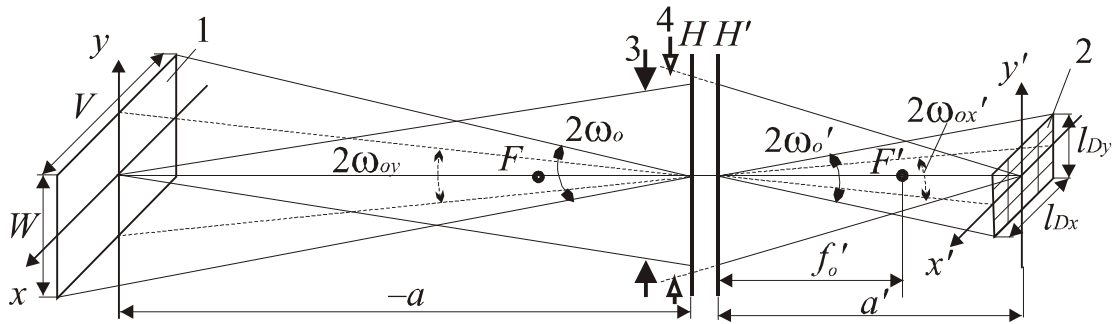


Рис. 4.2. Схема формування зображення в об'єктиві [57] : 1 – площина предметів; 2 – площина зображення; 3 – вхідна зіниця; 4 – вихідна зіниця

Межа геометричного просторового розділення тепловізора визначається розмірами чутливої площадки (точніше періодом матричної структури МБМ) $V_D \times W_D$ та фокусною відстанню об'єктива f'_o . Найменші кути, які відповідають миттєвим кутам поля зору повздовж осей x та y дорівнюють

$$\alpha_D = \frac{V_D}{f'_o}; \quad \beta_D = \frac{W_D}{f'_o}. \quad (4.3)$$

Найбільш повно просторове розділення об'єктива визначається його модуляційною передавальною функцією $M_o(v_x, v_y)$, яка являє собою модуль нормованого перетворення Фур'є від функції розсіювання точки (ФРТ). МПФ дифракційно обмеженого об'єктива з/без екранування дорівнює [111–113]:

$$M_{dif}(v_r) = \begin{cases} A & \text{при } k_{ob} = 0, \\ \frac{A + B + C}{1 - k_{ob}^2} & \text{при } k_{ob} \neq 0. \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\text{де } v_{r\max} = \frac{D_p}{\lambda f'_o}; \quad X = \frac{v_r}{v_{r\max}} = \frac{v_r \cdot \lambda \cdot f'_o}{D_{ob}} = v_r \cdot \lambda \cdot k_{eff}; \quad Y = \frac{X}{k_{ob}};$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{1 + k_{ob}^2 - 4X^2}{2k_{ob}}\right);$$

$$\beta = \arccos(X); \quad A = \begin{cases} \frac{2}{\pi}(\beta - X \cdot \sin(\beta)) & \text{при } 0 \leq X \leq 1, \\ 0 & \text{при } X > 1, \end{cases}$$

$$\gamma = \arccos(Y); \quad B = \begin{cases} \frac{2k_{ob}^2}{\pi}(\gamma - Y \cdot \sin(\gamma)) & \text{при } 0 \leq Y \leq 1, \\ 0 & \text{при } Y > 1, \end{cases}$$

$$C = \begin{cases} -2k_{ob}^2 & \text{при } 0 < X \leq 0.5(1 - k_{ob}), \\ 0 & \text{при } X > 0.5(1 + k_{ob}), \\ \frac{2k_{ob}}{\pi} \sin(\alpha) - \frac{2(1 - k_{ob}^2)}{\pi} \arctg\left(\frac{1 + k_{ob}}{1 - k_{ob}} \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) + \dots \\ \dots + \frac{1 + k_{ob}^2}{\pi} \alpha - 2k_{ob}^2 & \text{при } 0.5(1 - k_{ob}) < X \leq 0.5(1 + k_{ob}), \end{cases}$$

де k_{eff} - діафрагмове число, $k_{ob} = d_{ob}/D_{ob}$ - коефіцієнт екранування об'єктива, відношення внутрішнього діаметра об'єктива до зовнішнього.

Максимальне значення просторової частоти визначається із рівняння $M_O(v_{x,cut}) = 0$. Розв'язком цього рівняння є:

$$v_{x,cut} = \frac{1}{\lambda \cdot k_{eff}}. \quad (4.5)$$

Для практичного застосування МПФ формулу (4.4) апроксимують функцією [102]

$$M_O(v_x) = \begin{cases} 1 - \frac{X'}{\eta_{di}}, & \text{при } 0 \leq X' \leq \eta_{di}; \\ 0, & \text{при } X' > \eta_{di}, \end{cases} \quad (4.6)$$

де $X' = 1,218\lambda k_{eff} v_x$, а параметр η_{di} визначає відносне відхилення МПФ об'єктива з абераціями від дифракційно обмеженої МПФ. Для дифракційно обмеженої МПФ $\eta_{di} = 1,0$.

Одним з критеріїв роздільної здатності ν_{res}^c , який найбільш відповідає системам дистанційного спостереження, є зменшення МПФ до визначеної величини C_o . Якщо об'єктив має одномірну МПФ $M_o(v_x)$, а тест-об'єкт має контраст, який дорівнює одиниці, то роздільна здатність буде визначатися розв'язком рівнянням

$$M_o(\nu_{res}^c) = C_o. \quad (4.7)$$

Для математичного моделювання мікроболометричної матриці космічного тепловізора будемо використовувати наступні її характеристики:

- 1) Інтегральна чутливість R_D ;
- 2) Спектральна чутливість $R_D(\lambda)$;
- 3) Частотна характеристика чутливості $R_D(f)$;
- 4) Спектр потужності шуму $G_n(f)$;
- 5) Потужність, еквівалентна шуму NEP ;
- 6) Ефективна шумова смуга Δf ;
- 7) Питома здатність до виявлення D^* ;
- 8) Модуляційна передавальна функція M_D ;
- 9) Розмір чутливої площадки $v_D \times w_D$;
- 10) Період матричної структури $V_D \times W_D$;
- 11) Формат матриці $p_D \times q_D$.

Між чутливістю R_D та питомою здатністю до виявлення D^* існує зв'язок [57]:

$$R_D = D^* \frac{u_n}{\sqrt{A_D \Delta f}}, \quad (4.8)$$

де A_D – площа чутливої площадки приймача випромінювання (ПВ); u_n – середньоквадратичне значення шуму в заданій смузі частот Δf .

МПФ ПВ моделюється добутком двох функцій: просторової МПФ M_{Ds} , яка обумовлена геометричною формою чутливої площадки, та часової МПФ M_{Dt} , яка обумовлена інерційністю ПВ. Підсумкова МПФ ПВ визначається рівнянням

$$M_D = M_{Ds} M_{Dt}. \quad (4.9)$$

Просторова МПФ являє собою модуль нормованого перетворення Фур'є від розподілу чутливості $R_D(x', y')$ в межах чутливої площадки ПВ. Для одноелементного ПВ, чутливість якого в межах площадки прямокутної форми $V_D \times W_D$ є постійною, просторова МПФ визначається функцією [57]:

$$M_{Ds}(\nu_x, \nu_y) = \frac{\sin(\pi V_D \nu_x) \sin(\pi W_D \nu_y)}{\pi V_D \nu_x \pi W_D \nu_y}. \quad (4.10)$$

Для більшості ПВ часова МПФ визначається МПФ низькочастотного фільтра

$$M_{Dt}(f) = [1 + (2\pi t_D f)^2]^{-0,5}, \quad (4.11)$$

де t_D – стала часу ПВ.

При проектуванні важливо узгодити між собою параметри часу формування сигналу з пікселя t_o та параметром t_D . В монографії [57] показано, що між цими параметрами повинна дотримуватися нерівність

$$t_D \leq \frac{t_o}{\pi}. \quad (4.12)$$

МПФ МБМ зручно представити в вигляді добутку двох функцій: МПФ $M_{Ds1}(\nu_x, \nu_y)$ чутливої площадки пікселя та МПФ $M_{Dsd}(\nu_x, \nu_y)$, яка враховує процес просторової вибірки, що виконується матрицею. Для прямокутної форми чутливої площадки розміром $\nu_D \times w_D$ МПФ $M_{Ds1}(\nu_x, \nu_y)$ має вигляд аналогічний (4.10).

Функція $M_{Dsd}(\nu_x, \nu_y)$ визначається періодом вибірки. Якщо період матричної структури $V_D \times W_D$, то функція $M_{Dsd}(\nu_x, \nu_y)$ має вигляд [57]

$$M_{Dsd}(\nu_x, \nu_y) = V_D W_D \sin c(V_D \nu_x) \sin c(W_D \nu_y). \quad (4.13)$$

МБМ відносяться до класу теплових ПВ, які перетворюють випромінювання в тепло, а чутливий елемент перетворює цю зміну в електричний сигнал. У зв'язку з тим, що коефіцієнт поглинання мало залежить від довжини хвилі, теплові ПВ відносяться до неселективних ПВ, тобто в робочій спектральній області $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ їх чутливість та питома виявлювальна здатність є сталими величинами

$$\left. \begin{aligned} R_D(\lambda) &= R_{Dth}, \\ D^*(\lambda) &= D_{th}^*. \end{aligned} \right\}. \quad (4.14)$$

Для оцінки температурної чутливості МБМ та порівняння різних МБМ частіше використовують параметр *еквівалентна шуму різниця температур* $NETD$, який характеризує і тепловізор в цілому. Параметр $NETD$ розраховується за формулою [57]

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (4.15)$$

Для визначення $NETD$, як параметра МБМ, вважають, що [114]:

- Ефективне діафрагмове число $k_{eff} = 1$.
- Ефективна шумова смуга підсилювача $\Delta f = 1/(2t_i)$, де t_i – час інтегрування матриці, яке може дорівнювати сталій часу пікселя t_D . За таких допущень параметр МБМ $NETD$ визначається за формулою

$$NETD = \frac{4}{\sqrt{2A_D t_i} \cdot D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (4.16)$$

Покращити параметр $NETD$ МБМ можна:

- Збільшенням часу інтегрування t_i , яке обмежено сталою часу МБМ t_D .
- Збільшенням площі чутливого елемента A_D . Однак, збільшення площі $A_D = V_D \times W_D$ призводить до погіршення просторової роздільної здатності тепловізора.

В більшості випадків вважають електронний блок обробки сигналів є лінійна система з МПФ $M_{El}(f)$, яку можна визначити, як [115]

$$M_{El}(f) = \frac{C_{El}(f)}{C_{El}^{max}}, \quad (4.17)$$

де $C_{El}(f)$ – коефіцієнт підсилення на частоті f ; C_{El}^{max} – максимальне значення коефіцієнта підсилення.

Під час проходження сигналу і шуму через електронний тракт вони дискретизуються в часі та кантуються по амплітуді.

Підсилювач здійснює часову фільтрацію вхідного сигналу і являє собою низькочастотний фільтр. МПФ такого ідеального фільтру

$$M_{if}(f) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 0 \leq f \leq f_{\max}; \\ 0, & \text{якщо } f > f_{\max}. \end{cases} \quad (4.18)$$

Зв'язок частоти електричного сигналу f з просторовою частотою ν_x в площині МБМ визначається за формулою [57]

$$f = \frac{V_D}{t_o} \nu'_x, \quad \text{Гц}, \quad (4.19)$$

де t_o – час формування сигналу з одного пікселя.

Якщо максимальна просторова частота обмежена частотою Найквіста $\nu_N = 1/2 V_D$, то максимальну частоту відеосигналу визначають, як

$$f_{\max} = \frac{1}{2t_o}. \quad (4.20)$$

Ідеальний низькочастотний фільтр пропускає обмежений спектр корисного сигналу без спотворення і подавляє шум за межами смуги пропускання, що підвищує відношення сигнал/шум.

МПФ реального низькочастотного фільтру суттєво відрізняються від ідеального та часто апроксимуються поліномом. Найбільш поширеними стали низькочастотні фільтри Баттерворда, які забезпечують найбільш плоску характеристику в смузі пропускання [57].

4.1.1 Узгодження параметрів об'єктива та мікроболометричної матриці

Модуляційна передавальна функція космічного тепловізора залежить як від МПФ об'єктиву, так і від МПФ мікроболометричної матриці. Передаточну функцію можна використовувати тільки для лінійних інваріантних систем, а КТ, які призначені для спостереження об'єктів з невеликим температурним контрастом в межах обмеженого поля зору, можна вважати лінійними інваріантними системами. МПФ таких систем визначається добутком МПФ її окремих елементів: об'єктива, МБМ і

електронного тракту. В більшості випадків електронний тракт несуттєво спотворює зображення, яке створюється КТ, тому вважають, що МПФ електронного тракту дорівнює одиниці в межах просторового діапазону.

Для спрощення математичного моделювання будемо використовувати одномірний випадок вздовж осі x . При таких умовах МПФ КТ визначається як

$$M_S(\nu_x) = M_O(\nu_x)M_{Dx}(\nu_x), \quad (4.21)$$

де $M_S(\nu_x)$ – МПФ системи «об'єктив - МБМ»; $M_O(\nu_x)$ – МПФ об'єктива; $M_{Ds}(\nu_x)$ – просторова МПФ МБМ; ν_x – просторова частота в мм^{-1} .

Сучасні ІЧ об'єктиви мають аберації, які обмежені дифракцією випромінювання на апертурі об'єктива. В такому випадку МПФ об'єктива визначається функцією (4.6).

Просторова МПФ МБМ визначається функцією (4.10), яка для одновимірного випадку буде мати вигляд

$$M_{Dx}(\nu_x) = \frac{\sin(\pi V_D \nu_x)}{\pi V_D \nu_x}. \quad (4.22)$$

Таким чином, МПФ тепловізора залежить від радіуса кружка розсіювання r_o об'єктива (або кружка Ейрі r_E) та періоду пікселів V_D в МБМ. Для досягнення високої просторової роздільної здатності КТ необхідно ув'язати між собою параметри r_o та V_D [116].

1. *Перший критерій* – рівність МПФ об'єктива и МБМ на частоті Найквіста $\nu_N = 1/2V_D$, тобто коли виконується умова

$$M_O(\nu_N) = M_{Ds}(\nu_N) = M_1. \quad (4.23)$$

2. *Другий критерій* – рівність МПФ об'єктива і МБМ на заданій просторовій частоті ν_{x2} , тобто коли виконується умова

$$M_O(\nu_{x2}) = M_{Ds}(\nu_{x2}) = M_2. \quad (4.24)$$

Для узгодження параметрів КТ по першому критерію, спочатку визначимо залежність радіуса кружка розсіювання об'єктиву від періоду МБМ. Дифракційний кружок розсіювання Ейрі визначається рівнянням [57]

$$r_E = 1,22 \cdot \lambda \frac{f_o'}{D_p}. \quad (4.25)$$

Виходячи з рівнянь (4.6), (4.22), (4.23) та (4.25) отримаємо

$$1 - \frac{1,22 \lambda k_{eff}}{2V_D \eta_{di}} = \frac{\sin(\pi V_D / 2V_D)}{\pi V_D / 2V_D} = M_1 = \frac{2}{\pi}. \quad (4.26)$$

Тому залежність радіуса кружка Ейрі від періоду МБМ при узгодженні МПФ об'єктива та МБМ на частоті Найквіста визначається за формулою

$$r_E = 1,22 \cdot \lambda k_{eff} = \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) 2V_D \eta_{di} = 0,726 V_D \eta_{di}. \quad (4.27)$$

За таких умов узгодження підсумкова МПФ КТ на частоті Найквіста має контраст $M_{1S} = (2/\pi)^2 = 0,406$, тобто контраст зображення зменшиться до 40%.

На рис. 4.3 представлені МПФ об'єктива, МБМ та КТ, які визначаються формулами (4.6), (4.21), (4.22) при узгодженні їх на частоті Найквіста для довжини хвилі $\lambda = 10$ мкм та розміру пікселя $V_D = 25$ мкм. За таких умов відносне відхилення МПФ об'єктиву складає $\eta_{di} = 0,672$, що говорить про невеликі вимоги до виправлень аберацій в об'єктиві.

Для узгодження параметрів КТ по другому критерію використаємо формули (4.2), (4.22) та (4.24)

$$1 - \frac{r_E v_{x2}}{\eta_{di}} = \frac{\sin(\pi V_D v_{x2})}{\pi V_D v_{x2}} = M_2. \quad (4.28)$$

Розв'яжемо систему рівнянь (4.28) для визначення залежності радіуса кружка Ейрі об'єктива r_E від періоду матриці V_D при заданому контрасті M_2 . Спочатку визначимо з другого рівняння залежність просторової частоти узгодження v_{x2} від значення МПФ M_2 :

$$\frac{\sin(\pi V_D \nu_{x2})}{\pi V_D \nu_{x2}} = \text{sinc}(\pi V_D \nu_{x2}) = M_2.$$

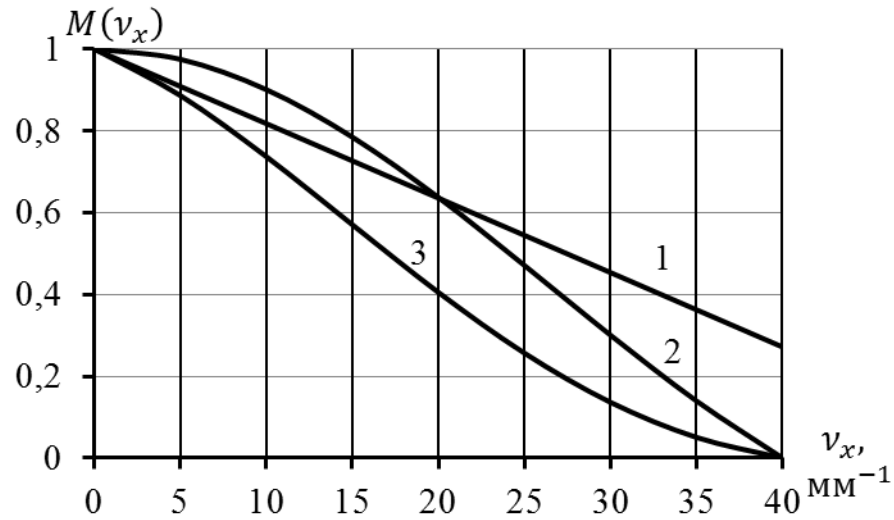


Рис. 4.3. Узгодження параметрів об'єктива r_o та МБМ V_D по першому критерію: 1 – МПФ об'єктива $M_O(\nu_x)$ при $\eta_{di}=0,672$; 2 – просторова МПФ МБМ $M_{Ds}(\nu_x)$; 3 – МПФ тепловізора $M_S(\nu_x)$

Звідси

$$\nu_{x2} = \frac{1}{V_D} \text{sinc}^{-1}(M_2), \quad (4.29)$$

де $\text{sinc}^{-1}(z)$ – функція, що обернена функції $\text{sinc}(z)$.

Підставивши частоту (4.29) в рівняння (4.28) отримаємо:

$$1 - \frac{r_E}{\eta_{di}} \frac{1}{V_D} \text{sinc}^{-1}(M_2) = M_2.$$

Звідси

$$r_E = \frac{1 - M_2}{\text{sinc}^{-1}(M_2)} \eta_{di} V_D. \quad (4.30)$$

Для перевірки достовірності отриманого рівняння (4.30) розглянемо застосування цього рівняння при узгодженні за першим критерієм, коли $M_2=2/\pi$.

$$r_E = \frac{1 - 2/\pi}{\text{sinc}^{-1}(2/\pi)} \eta_{di} V_D = 0,726 \eta_{di} V_D,$$

що співпадає з формулою (4.27). На рис. 4.4 представлені МПФ об'єктива, МБМ та тепловізора, які визначені формулами (4.2), (4.22) та (4.24) при їх узгодженні по другому критерію (4.28), коли $k_{eff}=1$, $\lambda=10$ мкм, $V_D=25$ мкм, $\eta_{di}=1,0$.

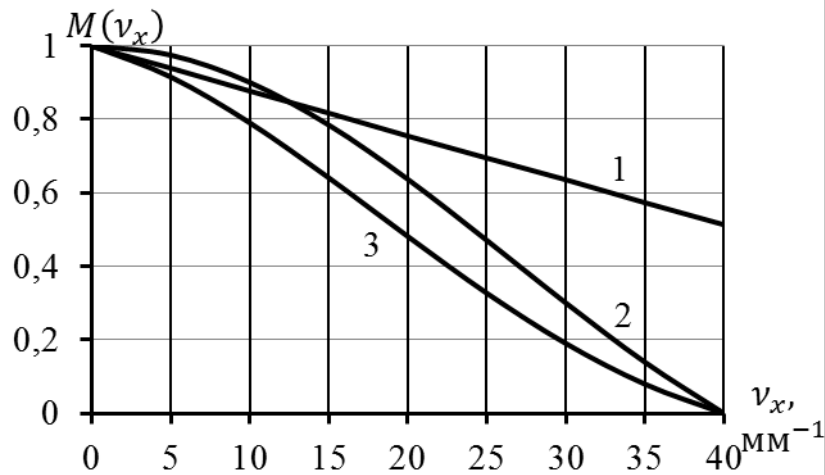


Рис. 4.4. Узгодження параметрів об'єктива r_O та МБМ V_D по другому критерію: 1 – МПФ дифракційного об'єктива $M_O(v_x)$ при $\eta_{di}=1,0$;

2 – просторова МПФ МБМ $M_{Ds}(v_x)$; 3 – МПФ тепловізора $M_S(v_x)$

При узгодженні по другому критерію контраст зображення КТ на частоті Найквіста зменшується до 0,406. Для дифракційно обмеженого об'єктива підсумкова МПФ на частоті Найквіста дорівнює 0,482, що свідчить про підвищення контрасту на 7,6% відносно зображення, отриманого при узгодженні за першим критерієм. При таких умовах узгодження відбувається на частоті $v_{x2}=13$ мм⁻¹ при контрасті $M_2=0,88$.

В останній час завдяки технологічному розвитку з'явилися МБМ з періодом пікселів $V_D=17$ мкм. Проведемо аналіз МПФ тепловізора $M_S(v_x)$, який використовує таку матрицю.

На рис. 4.5 представлені МПФ об'єктива, МБМ та тепловізора, які визначені формулами (4.2), (4.22) та (4.24) при їх узгодженні за першим критерієм (4.23), коли $k_{eff}=1$, $\lambda=10$ мкм, $V_D=17$ мкм, $\eta_{di}=1,0$.

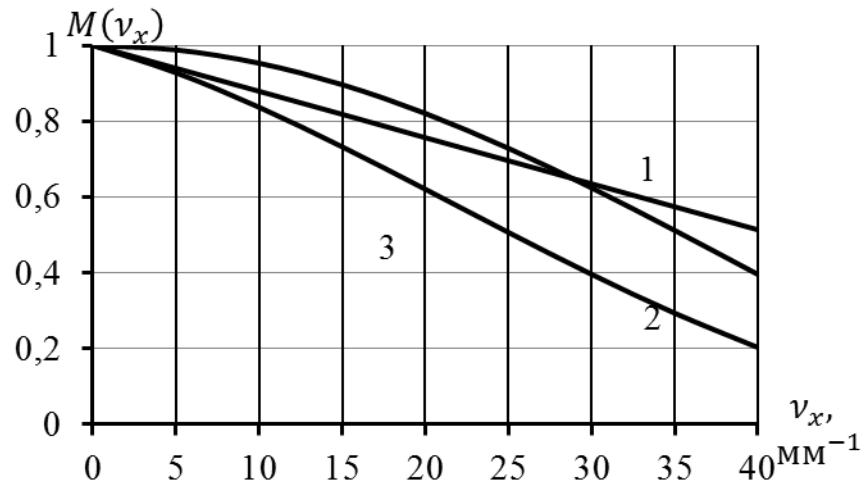


Рис. 4.5. Узгодження параметрів об'єктива r_O та МБМ V_D по першому критерію: 1 – МПФ дифракційного об'єктива $M_O(v_x)$ при $\eta_{di}=1,0$;

2 – просторова МПФ МБМ $M_{Ds}(v_x)$ при $V_D=17$ мкм;

3 – МПФ тепловізора $M_S(v_x)$

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що узгодження дифракційно обмеженого об'єктива на довжині хвилі $\lambda=10$ мкм з матрицею, яка має період пікселів $V_D=17$ мкм відбувається на просторовій частоті $v_x=28$ мм⁻¹, що близька до частоти Найквіста ($v_N=29$ мм⁻¹). При цьому МПФ тепловізора на частоті Найквіста, як і в випадку з матрицею з періодом пікселів $V_D=25$ мкм, складає $M_S(v_x)\approx 0,4$, але для просторової частоти $v_x=20$ мм⁻¹, яка для матриці з періодом пікселів $V_D=25$ мкм відповідає частоті Найквіста, підсумкова МПФ тепловізора з МБМ з $V_D=17$ мкм буде $M_S(v_x)\approx 0,62$. Таким чином, контраст зображення об'єктів з просторовою частотою $v_x=20$ мм⁻¹ в тепловізорі при використанні матриці з $V_D=17$ мкм буде в 1,53 рази більше ніж при використанні МБМ з $V_D=25$ мкм. Але найбільш об'єктивним критерієм оцінки переваги тої чи іншої матриці буде мінімальна роздільна різниця температур **MRTD** тепловізора, яка дозволить встановити значення просторової роздільної здатності тепловізора при заданому температурному контрасті тест-об'єкта [116,117].

4.1.2 Мінімальна роздільна різниця температур тепловізійної камери космічного базування

Класичне визначення MRPT формулюється таким чином. *Мінімальна роздільна різниця температур $MRTD(v_x)$* (Minimum Resolvable Temperature Difference) – це мінімальна різниця ефективних температур між штрихами тест-об'єкта з заданою просторовою частотою і фоном, яка дозволяє візуально на екрані дисплея розділяти (спостерігати роздільно) штрихи тест-об'єкта.

Тест-об'єкт – це 4-штрихова міра Фуко, в якій штрихи і проміжки між ними мають однакову ширину $\xi_{tp,x} = \omega_{tp}$, а їхня висота дорівнює $\xi_{tp,y} = 7\omega_{tp}$. Штрихи і проміжки міри випромінюють як абсолютно чорне тіло. Просторова частота міри $v_x = 1/2\omega_{tp}$ вимірюється в кутових або лінійних величинах (частіше в мрад⁻¹ або мм⁻¹). Структура із 4 штрихів з однаковими відстанями між ними та співвідношенням висоти до ширини 7 : 1 забезпечує певну періодичність у напрямку x і нескінченну протяжність штрихів у напрямку y (рис. 4.6).

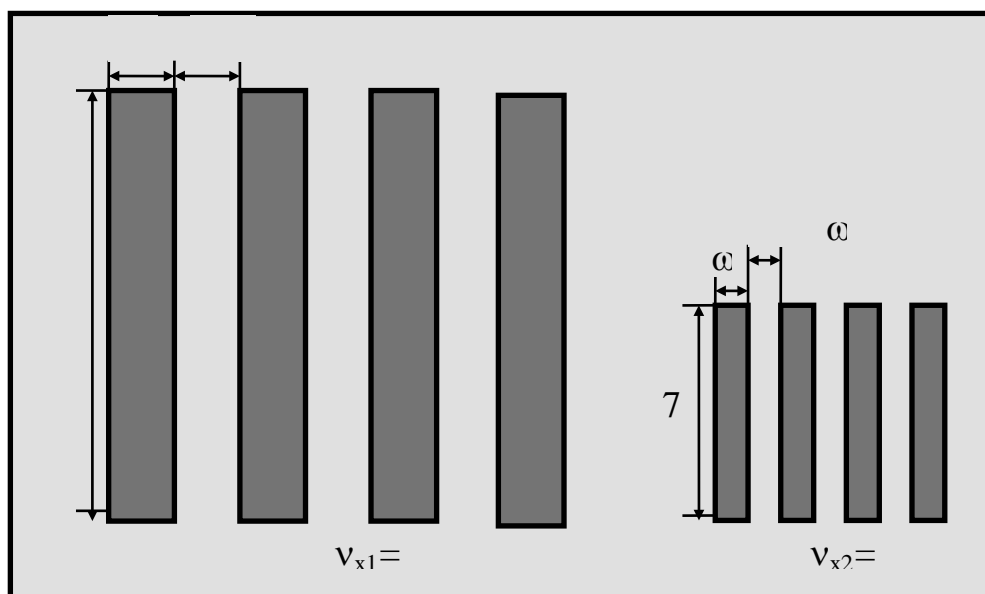


Рис. 4.6. Міра Фуко

Для ТПСС аерокосмічного базування пропонується використовувати аналогічне визначення MRPT, де аналізується електронне зображення міри

Фуко за допомогою порогового пристрою [57]. Пороговий пристрій визначає наявність міри Фуко в електронному зображенні, якщо сигнал від штрихів міри перевищує в SNR разів шуми зображення, де SNR – відношення сигнал/шум.

Виведемо формулу для розрахунку функції $MRTD(\nu_x)$, враховуючи при цьому, що:

1) формування зображення тест-об'єкта відбувається з урахуванням просторової роздільної здатності ТПСС, яка визначається модуляційною передавальною функцією системи $M_s(\nu_x)$;

2) ТПСС характеризується еквівалентною шуму різницею температур $NETD$ (Noise Equivalent Temperature Difference);

3) тест-об'єкт розташовується на незначній відстані від ТПСС. Тоді можна вважати, що випромінювання мало поглинається під час проходження через атмосферу, тобто в робочому спектральному діапазоні коефіцієнт пропускання атмосфери $\tau_A(\lambda) \approx 1$;

4) ефективну шумову смугу електронного блоку обробки сигналів визначають за формулою

$$\Delta f = \frac{1}{NEP_{\max}} \int_0^{\infty} NEP(f) |H_{f,tp}(f)|^2 df, \quad (4.31)$$

де $NEP(f)$ – спектральна щільність потужності шуму; $H_{f,tp}(f)$ – передавальна функція еталонного фільтра, яку визначають за формулою

$$H_{f,tp}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^{-0.5}. \quad (4.32)$$

Тут $f_0 = 1/(2t_o)$, t_o – час формування одного елемента зображення.

Відношення сигнал/шум на виході електронного блоку визначається як

$$SNR = \frac{\Delta T \cdot M_{tp}(\nu_x)}{NETD}, \quad (4.33)$$

де ΔT – температурний контраст міри. Параметр $NETD$ визначає шуми на виході еталонного фільтра з ефективною шумовою смугою Δf , а $\Delta T \cdot M_{tp}(\nu_x)$ – сигнал з урахуванням просторової роздільної здатності ТПСС. Для розрахунку відношення сигнал/шум потрібно врахувати відмінність ефективної шумової смуги ТПСС, що враховує спектр потужності шумів ПВ $NPS(f)$ та МПФ електронного тракту $M_{El}(f)$, від ефективної шумової смуги еталонного фільтра Δf . Тоді відношення сигнал/шум на виході електронного блоку буде дорівнювати

$$SNR = \frac{\Delta T \cdot M_{tp}(\nu_x)}{NETD} \times \sqrt{\frac{\Delta f}{\int_0^\infty NPS(f) |H_{f,tp}(f)|^2 M_{El}^2(f) df}}. \quad (4.34)$$

Оскільки величину $M_s(\nu_x)$ визначено для синусоїдальної міри, а тест-об'єкт для визначення $MRTD$ є прямокутною мірою, то потрібно ввести поправку на розклад Фур'є просторової функції випромінювання прямокутної міри. Відомо, що амплітуда першої гармоніки прямокутного сигналу в $4/\pi$ рази більша за амплітуду синусоїдального сигналу того ж періоду й амплітуди [57].

Звідси випливає, що

$$M_{tp}(\nu_x) = \frac{4}{\pi} M_s(\nu_x). \quad (4.35)$$

З урахуванням цих зауважень відношення сигнал/шум, що надходить до порогового пристрою для розпізнавання штрихової міри в електронному зображенні, матиме такий вигляд:

$$SNR_r = \frac{\Delta T}{NETD} \frac{4}{\pi} M_s(\nu_x) \sqrt{\frac{\Delta f}{\int_0^\infty NPS(f) |H_{f,tp}(f)|^2 M_{El}^2(f) df}}. \quad (4.36)$$

Потрібне число SNR_r для розпізнавання (виявлення) штрихової міри відоме. Наприклад, якщо ймовірність розпізнавання 0.9, необхідно, щоб

$SNR_r=4.5$ [57]. Якщо підставити це числове значення в (4.37), то ΔT буде шуканою функцією $MRTD$ просторової частоти ν_x .

Під час практичного застосування функції $MRTD(\nu_x)$ допускають, що у робочій смузі пропускання ТПСС шум «білий», а електронний блок має достатньо широку ефективну шумову смугу пропускання порівняно із смугою еталонного фільтра, тобто $M_{El}(f) \approx 1$. За цих умов справедливе співвідношення

$$\sqrt{\frac{\Delta f}{\int_0^{\infty} NPS(f) |H_{f,tp}(f)|^2 M_{El}^2(f) df}} = 1. \quad (4.37)$$

З урахуванням цього отримаємо формулу для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур:

$$\Delta T = MRTD(\nu_x) = \frac{\pi}{4} SNR_r \frac{NETD}{M_s(\nu_x)}. \quad (4.38)$$

З урахуванням коефіцієнтів пропускання атмосфери τ_A та об'єктива τ_o формула для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур приймає вигляд [117, 118]:

$$MRTD(\nu_x) = \frac{\pi}{4} SNR_r \frac{NETD}{M_s(\nu_x) \cdot \tau_A \cdot \tau_o}. \quad (4.39)$$

Важливість функції $MRTD(\nu_x)$ як узагальненої характеристики ТПСС у тому, що вона визначає температурну чутливість на низькій просторовій частоті (для об'єктів великих розмірів) і просторове розділення на високих частотах. Функція $MRTD(\nu_x)$ дозволяє ефективно порівнювати ТПСС, тому що враховує всю систему в цілому і її шуми. Оскільки $MRPT$ - це функція просторової частоти ν_x і параметрів ТПСС, а також $NETD$, то, використовуючи залежність $MRTD(\nu_x)$, можна знайти просторову роздільну здатність системи ν_{res} . В результаті аналізу математичної моделі визначено, що підвищувати температурну роздільну здатність можна використовуючи більш світлосильні об'єктиви з високим коефіцієнтом пропускання та

приймачі випромінювання з високою питомою виявлювальною здатністю [119].

4.1.3 МПФ «змазу» при роботі космічного тепловізора з мікроболометричною матрицею

При роботі ОЕС при зміщенні зображення під час експозиції відбувається «змаз» зображення, МПФ якого описується функцією

$$M_{\omega}(v_x, v_y) = \frac{\sin(\pi v_x \Delta X_{\omega_x})}{\pi v_x \Delta X_{\omega_x}} \frac{\sin(\pi v_y \Delta Y_{\omega_y})}{\pi v_y \Delta Y_{\omega_y}}. \quad (4.140)$$

Особливістю роботи мікроболометричного приймача випромінювання (МБМ) є досить велике значення теплової сталої часу τ_{th} по відношенню до часу експозиції t в порівнянні з фотонними фотоприймачами, тому очікується значний вплив теплової сталої часу на МПФ [120].

Розподіл температури синусоїдальної міри можна представити у вигляді

$$T(x, v_x) = \frac{T_0}{2} \left[1 + \frac{\Delta T}{T_0} \cos(2\pi v_x x) \right], \quad (4.141)$$

де $T_0 = T_{\max} + T_{\min}$, $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$, v_x - просторова частота міри.

Температуру чутливого елемента МБМ (пікселя), яка відповідає кількості падаючої на нього інтегральної енергії можна визначити як

$$T_{px} = \sum_{i=1}^N T_i(x, v_x) \cdot \Delta p, \quad (4.142)$$

де Δp - крок в межах одного пікселя, $T_i(x)$ - значення температури тест-об'єкта в залежності від координати x .

Відносна чутливість болометричних приймачів до випромінювання з урахуванням теплової сталої часу та часу експозиції описується виразом [121]

$$R = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th}}}. \quad (4.143)$$

При зміщенні зображення тест-об'єкта відносно пікселя на величину Δx відбувається зміна температури від T_{px1} до T_{px2} . Таким чином, сигнал, який відповідає середній температурі на виході пікселя дорівнює

$$T_{out}(x + \Delta x, v_x) = [T_{px2}(x + \Delta x, v_x) - T_{px1}(x, v_x)] \cdot R + T_{px1}(x, v_x). \quad (4.144)$$

Крок зміщення зображення Δx в площині приймача випромінювання за час експозиції t складає

$$\Delta x = \frac{V_{nm} f'_o}{h_f} t. \quad (4.145)$$

В результаті за один кадр на виході приймача випромінювання сформується сумарний сигнал, який відповідає розподілу температур на пікселях з урахуванням зміщення зображення. При цьому контраст зображення буде

$$C(v_x) = \frac{T_{\max}(v_x) - T_{\min}(v_x)}{T_{\max}(v_x) + T_{\min}(v_x)}. \quad (4.146)$$

Максимальний контраст $C_0(v_x)$ буде досягнуто при відсутності руху зображення, тобто коли за час експозиції зміщення зображення $\Delta x = 0$. Для розрахунку зміни МПФ внаслідок «зсуву» зображення отримане значення контрасту нормується до значення контрасту для відповідної просторової частоти при відсутності руху

$$M_{3C.MBM}(v_x) = \frac{C(v_x)}{C_0(v_x)}. \quad (4.147)$$

На рис. 4.7 наведені функції $M_{3C.MBM}(v_x)$ при часу експозиції $t = 0,033$ секунд при різних значеннях теплової сталої часу та часу зміщення зображення на 1 піксель $t_{3M} = 0,015$ секунд, а на рис. 4.8 наведені функції $M_{3C.MBM}(v_x)$ при тих же самих умовах, але часу експозиції $t = 0,016$ секунд.

Із графіків видно, що збільшення теплової сталої часу погіршує МПФ «зсуву» при застосуванні мікроболометричною матриці, а підвищення частоти кадрів, тобто зменшення часу експозиції по відношенню до часу

зміщення зображення на один піксель навпаки покращує МПФ «зсуву». При часі експозиції меншій за час зміщення зображення на один піксель вплив теплової сталої часу стає не таким значним, а МПФ «зсуву» практично співпадає з МПФ «зсуву» фотонного фотоприймача.

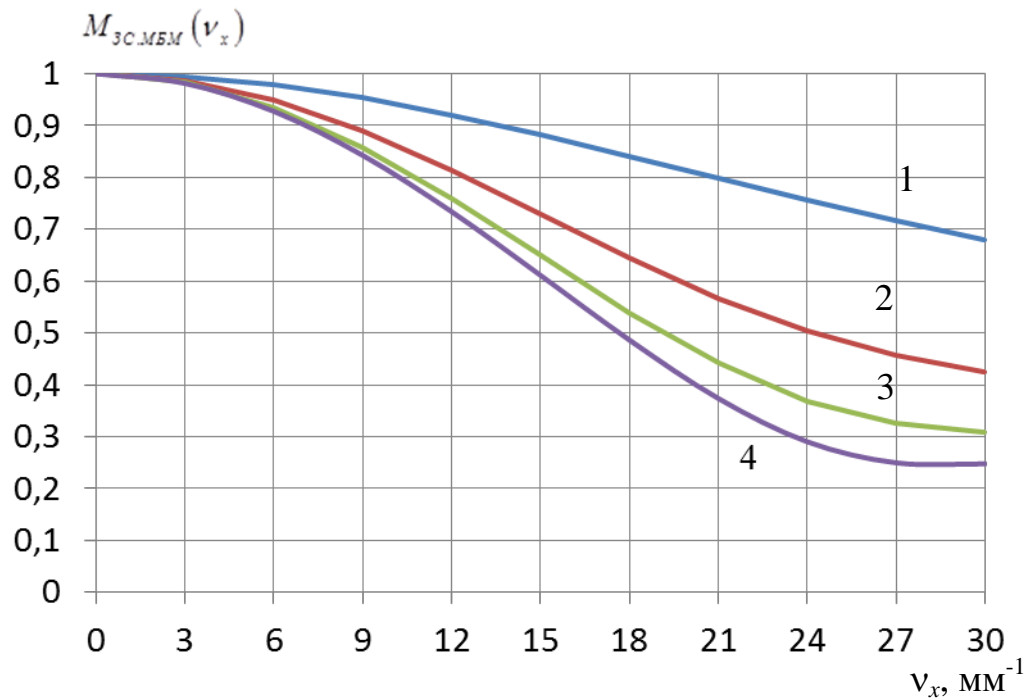


Рис. 4.7. МПФ «зсуву» мікроболометричної матриці при часі експозиції 33 мс для теплової сталої МБМ: 1 – 5 мс; 2 – 10 мс; 3 – 15 мс; 4 – 20 мс

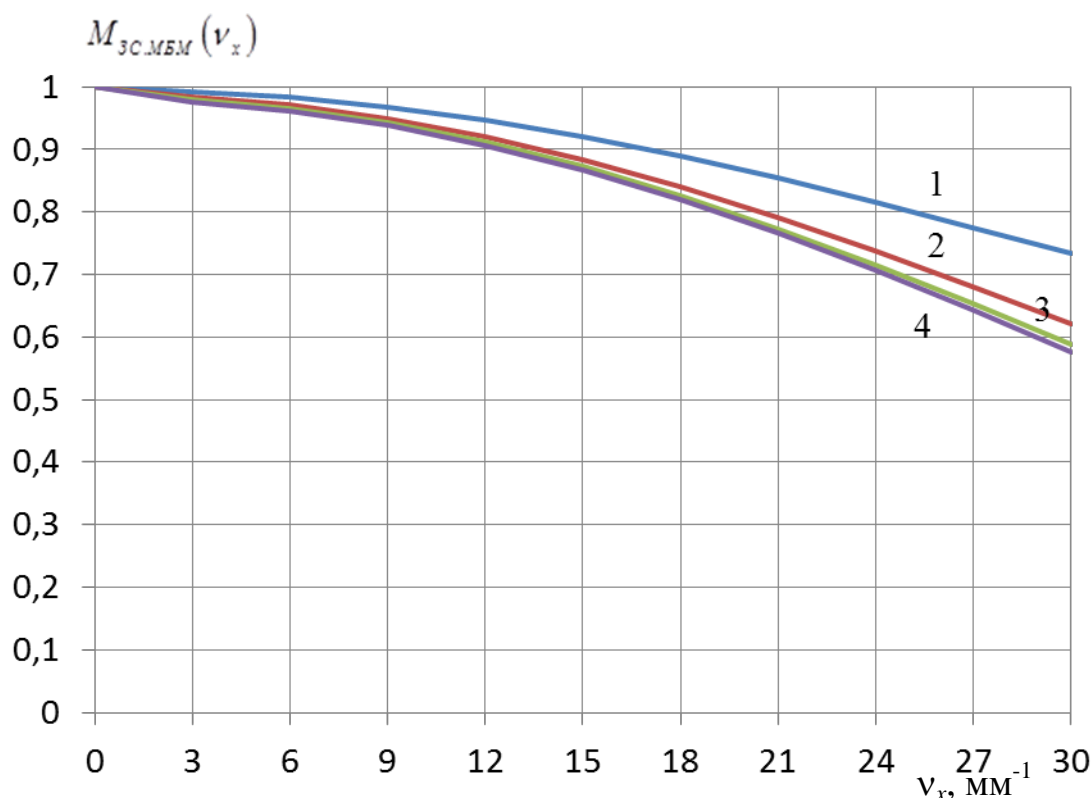


Рис. 4.8. МПФ «зсуву» мікроболометричної матриці при експозиції 15 мс для теплової сталої МБМ: 1 – 5 мс; 2 – 10 мс; 3 – 15 мс; 4 – 20 мс

4.2 Підвищення просторової роздільної здатності тепловізійної камери шляхом реєстрації та обробки зображень з субпіксельним зміщенням

Просторова роздільна здатність аерокосмічних зображень є однією з найважливіших характеристик, що впливає на ефективність розв'язання задач дистанційного зондування Землі [6]. В сучасних системах ДЗЗ для отримання зображень широко використовують багатоелементні (матричні) приймачі випромінювання [7]. Забезпечення високого просторового розділення отримуваних зображень при постійному значенні поля зору потребує збільшення кількості елементів матричного приймача [8]. Але це призводить до суттєвого ускладнення конструкції знімальної апаратури і підвищення її вартості. Крім того, технологія виготовлення детекторів матричного фотоприймача накладає жорсткі обмеження на збільшення їх кількості.

Для розв'язання даної проблеми використовують режим субпіксельної реєстрації зображень – *мікросканування* [8], і подальшу *субпіксельну обробку* отриманих кадрів з метою відновлення зображення високого розділення. *Мікросканування* полягає в багаторазовому послідовному отриманні декількох зображень тієї ж самої сцени, зміщених одне відносно одного на певну долю геометричного розміру пікселя [122]. *Субпіксельна обробка (відновлення)* – програмна обробка для обчислення окремих значень сигналів від умовних частин пікселів – субпікселів [123]. Існує багато методів підвищення просторового розділення зображень: 1) лінійні (інтерполяція, ресемплінг, білінійна інтерполяція, кубічних сплайнів); 2) нелінійні (градієнтні алгоритми, метод скривленої відстані WADI, інтерполяція по контурам NEDI); 3) супер розділення на базі відновлення зображень (частотні, просторові, регуляризації, вейвлет перетворень) [124,125]. Одним зі способів підвищення просторового розділення багатоспектральних аерокосмічних зображень є застосування пристрою класифікації спектральних сигнатур об'єктів [128].

Другим механізмом підвищення просторового розділення є механізм субпіксельної реєстрації зображень при дистанційному зніманні ІЧ-камерою космічного базування, який ефективно здійснюється шляхом повороту матричного приймача випромінювання (або всієї камери) відносно напрямку польоту КА [129].

Припустимо, що вісь x' направлена вздовж проекції стовпців матриці на поверхню Землі, вісь x – вздовж напрямку польоту КА, вісь y' – вздовж проекції рядків матриці на поверхню Землі, y – перпендикулярно до осі x таким чином, що система координат $x'y'$ є системою координат $xу$, розвернутою на кут α_1 (рис. 4.9).

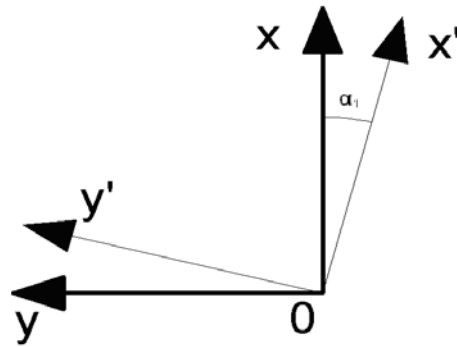


Рис. 4.9. Взаємне розташування систем координат $x'y'$ та xy при повороті приймача випромінювання вправо

Очевидно, що кут нахилу матриці відносно напрямку польоту КА залежить від комбінації коефіцієнтів зміщення проекцій кадрів (рис. 4.10).

Субпіксельна обробка дозволяє підвищити роздільну здатність зображення, не змінюючи розмір пікселів. Синтез зображення з високою роздільною здатністю здійснюється на основі інформації, що містяться в групі кадрів з нижчою роздільною здатністю. Кадри повинні містити зображення тієї самої ділянки місцевості, але зміщені на субпіксельні відстані по обом координатам [128].

Мінімальна необхідна кількість кадрів n для субпіксельної обробки дорівнює двом і вона має дорівнювати коефіцієнту лінійного підвищення роздільної здатності зображення. При цьому коефіцієнт відношення кроку великої сітки до кроку дрібної називається коефіцієнтом підвищення розділення зображення [129].

Отримати зображення з підвищеною роздільною здатністю можна шляхом формування декількох геометрично зміщених зображень за рахунок руху носія знімальної апаратури. Для забезпечення величини зміщення зображення вздовж напрямку орбітального руху носія на частку пікселя, що дорівнює $k_x = 1/n$ пікселя. При цьому часовий інтервал t між формуваннями суміжних кадрів повинен дорівнювати [130]

$$t = \frac{P_3 \cdot h_f}{V_{nm} \cdot n \cdot f'_O}, \quad (4.148)$$

де P_3 – геометричний розмір пікселя матричного приймача випромінювання.

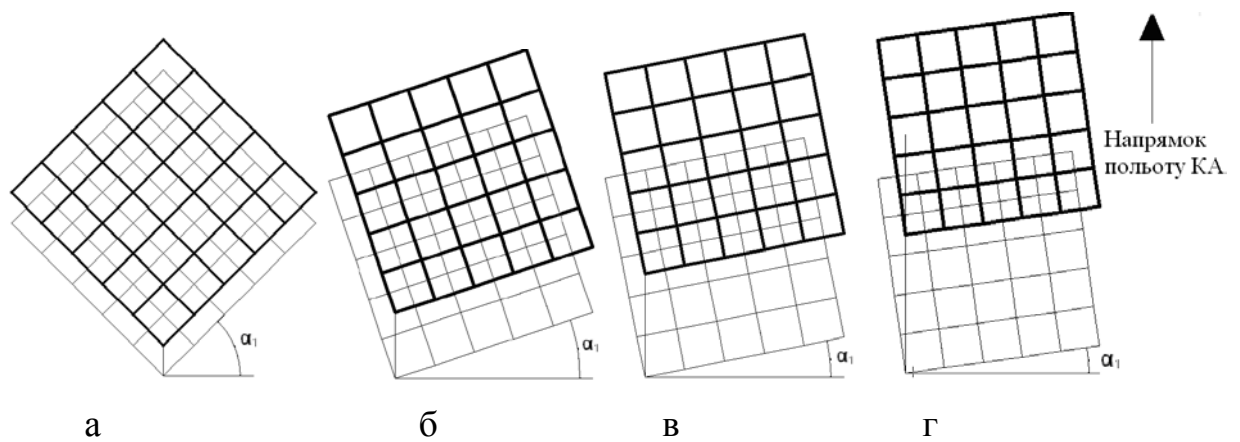


Рис. 4.10. Можливі варіанти повороту матриці пікселів для забезпечення коефіцієнтів зміщення проєкцій кадрів кратними 0,5

Субпіксельну реєстрацію зображень можна реалізувати, використовуючи поворот матричного приймача випромінювання відносно напрямку орбітального руху носія. Наприклад, для забезпечення однакового вздовж стовпців і рядків приймача випромінювання зміщення, рівного $n = 1$ пікселя, використовується поворот матричного приймача випромінювання на кут $\varphi = 45^\circ$ відносно напрямку орбітального руху носія. У цьому разі часовий інтервал з геометричних міркувань матиме значення [131]:

$$t = \frac{P_3 \cdot h_f \cdot \cos \alpha_1}{V_{nm} \cdot n \cdot f'_O}. \quad (4.149)$$

Поворот матричного приймача випромінювання на значні кути відносно орбітального руху носія апаратури при дистанційній зйомці поверхні Землі може призвести не тільки до зменшення ширини смуги зйомки, але й до значних викривлень та розривів зображення, неприпустимих в реальних системах. Тому краще здійснювати різні субпіксельні зміщення вздовж повздовжньої та поперечної осей МПВ з метою підвищення ступеня колінеарності з напрямком орбітального руху носія. Крім того, зміщення вздовж повздовжньої осі може бути також більше одного пікселя, але при цьому буде втрачено кілька рядків зображення по передньому та задньому краях МПВ.

Зміщення вздовж поперечної осі складатиме $k_x = 1/n$, а вздовж проекції стовпців $k_y = (z + k/n)$ пікселя, де $z \geq 0$ – ціле число, яке визначає кількість “пропущених” рядків, k – ціле число, $0 < k < n$ [127]. Для створення рівномірної по осях піксельної сітки при парному значенні n значення k повинні бути непарними (рис. 4.11). Різне, але дискретне зміщення по двом різним осям не впливає на загальний алгоритм подальшої обробки знімків, а тільки дає можливість універсально обробляти дані з урахуванням відповідних коефіцієнтів k_x , k_y [132].

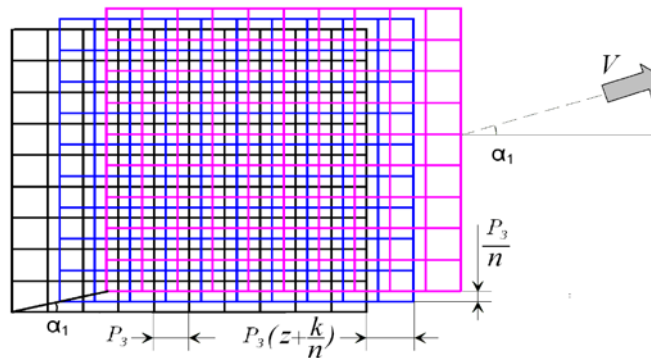


Рис. 4.11. Проекції кадрів, отриманих в результаті субпіксельної реєстрації [127]

В такому випадку кут φ повороту МПВ відносно напрямку орбітального руху носія визначатиметься відношенням зміщень по осях [127]:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{1}{zn + k}\right). \quad (4.150)$$

Крім руху КА на переміщення підсупутникової точки впливає обертання Землі. Ступінь впливу обертання Землі залежить від широти місцевості, що знімається, і ділянки орбіти (низхідна у випадку роботи спектро радіометра) [7]. Наведена формула не враховує вплив обертання Землі, який детально розглянуто в інших роботах.

Таким чином, субпіксельні зміщення зображення вздовж рядків і стовпців матричного приймача випромінювання здійснюються за рахунок власного руху носія знімальної апаратури та повороту МПВ або його носія на

заданий кут відносно напрямку орбітального руху носія. Причому необхідна величина геометричних зміщень по осях забезпечується дотриманням розрахованого часового інтервалу між формуванням суміжних кадрів в залежності від висоти польоту, шляхової швидкості носія та параметрів знімального приладу. Зменшення куту повороту МПВ збільшує часовий інтервал між формуванням суміжних кадрів та послабляє вимоги до швидкодії знімальної апаратури. При цьому збільшується число пропущених рядків і тим самим зменшує зону перекриття субпіксельно зміщених кадрів, яку можна відновити з підвищенням просторової роздільної здатності.

Пристрій для реалізації субпіксельної реєстрації зображень містить об'єktiv, спектроподільний пристрій, що формує задані спектральні діапазони, МПВ, розташований під заданим кутом відносно напрямку орбітального руху носія та з'єднаний з МПВ електронний блок для управління часовим інтервалом між формуванням суміжних кадрів в кожному спектральному діапазоні та зберігання отриманих зображень [135].

Якість зображення ОЕС оцінюється МПФ, яка є добутком МПФ її складових: об'єктива, приймача випромінювання та електронного тракту

$$M_S(v_X, v_Y) = M_O(v_X, v_Y) M_D(v_X, v_Y) M_{Dt}(f) M_{El}(f). \quad (4.151)$$

Просторова МПФ приймача випромінювання залежить від розміру пікселя $V_D \times W_D$ та обмежується частотою Найквіста. При формуванні субпіксельної сітки зменшується розмір комірки зображення, що еквівалентно зміщенню просторової частоти Найквіста на певну величину.

Розмір еквівалентного субпікселя визначається, як

$$V_{DSR} = \frac{V_D}{k_{SR}}, \quad W_{DSR} = \frac{W_D}{k_{SR}}, \quad (4.152)$$

де k_{SR} – коефіцієнт підвищення роздільної здатності при субпіксельній реєстрації [132].

З урахуванням розміру еквівалентного субпікселя просторова МПФ приймача випромінювання буде:

$$M_{DSR}(\nu_x, \nu_y) = \frac{\sin(\pi \nu_x V_{DSR})}{\pi \nu_x V_{DSR}} \frac{\sin(\pi \nu_y W_{DSR})}{\pi \nu_y W_{DSR}}, \quad (4.153)$$

а МПФ всієї системи:

$$M_{SSR}(\nu_x, \nu_y) = M_O(\nu_x, \nu_y) M_{DSR}(\nu_x, \nu_y) M_{Dt}(f) M_{El}(f). \quad (4.154)$$

Завдяки тому, що при субпіксельній реєстрації збільшується $M_{DSR}(\nu_x, \nu_y)$, то й збільшується МПФ всієї системи та підвищується якість зображення (рис. 4.12).

Роздільна здатність тепловізійної космічної камери спостереження, як було описано вище, визначається $MRTD$, в формулу якої входить МПФ всієї системи

$$MRTD(\nu_x) = SNR_r \frac{\pi NETD}{4 M_{SSR}(\nu_x) \tau_o \tau_A K_{\Delta\lambda}}. \quad (4.155)$$

На рис. 4.13 представлені графіки функції $MRTD$, які розраховані за формулою (4.155) при різних коефіцієнтах підвищення роздільної здатності при субпіксельній реєстрації.

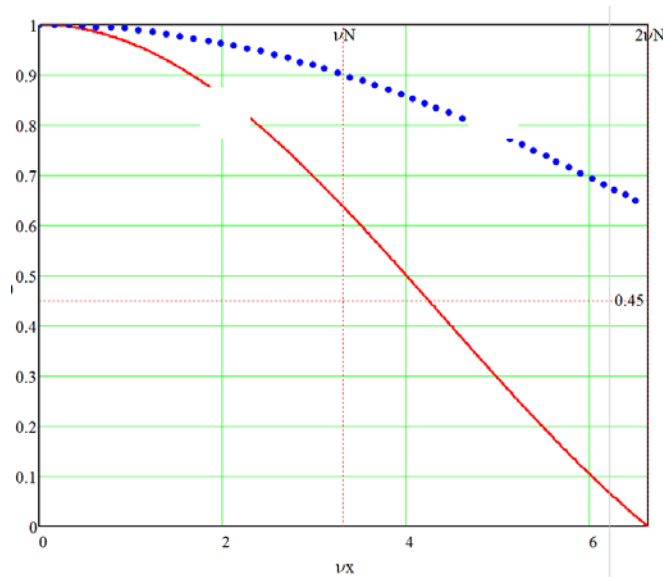


Рис. 4.12. Графік залежності просторової МПФ мікроболометричної матриці $M_{DSR}(\nu_x)$ з субпіксельною реєстрацією від просторової частоти,

коли : 1 – $k_{SR} = 1$; 2 – $k_{SR} = 2$

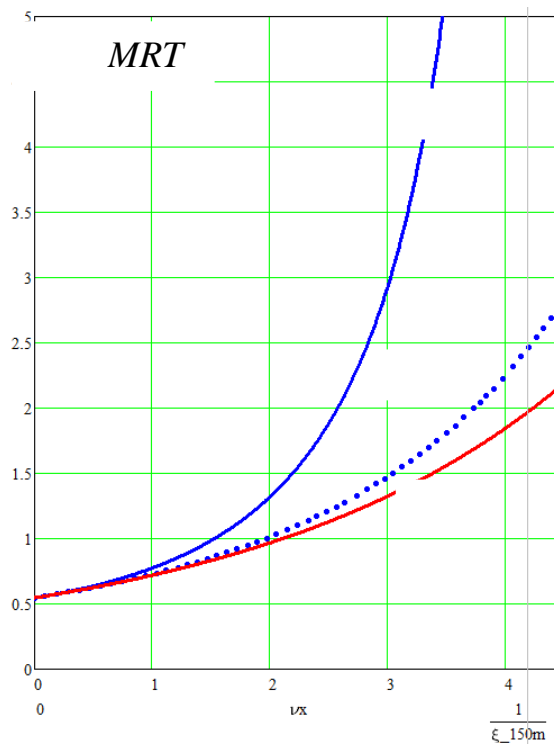


Рис. 4.13. Графік залежності мінімально роздільної різниці температур $MRTD(v_x)$ мікроболометричної камери від просторової частоти, коли:

$$1 - k_{SR} = 1; 2 - k_{SR} = 2; 3 - k_{SR} = 3$$

З графіку видно, що застосування коефіцієнту підвищення роздільної здатності $k_{SR} = 2$, тобто реєстрація двох субпіксельної зміщених знімка, значно підвищує $MRTD$, особливо на високих просторових частотах [135, 136]. Подальше збільшення коефіцієнту підвищення роздільної здатності не призводить до значного покращення $MRTD$ в наслідок того, що МПФ об'єктиву підходить до своєї дифракційної межі.

Збільшення $MRTD$ можна охарактеризувати коефіцієнтом покращення $MRTD$ k_{MRTD} в залежності від просторової частоти

$$k_{MRTD}(v_x, v_y) = \frac{M_{DSR}(v_x, v_y)}{M_D(v_x, v_y)}. \quad (4.156)$$

Дослідження функції (4.146) показує, що для низьких просторових частот застосування субпіксельної реєстрації не покращує $MRTD$ та з ростом просторової частоти вплив субпіксельної реєстрації на $MRTD$

зростає, досягаючи для частоти Найквіста значення $k_{MRTD}(\nu_x) = 1,41$ та ще більше зростає на просторових частотах, що знаходяться за межею частоти Найквіста.

За умовою введення до багатоспектрального знімального пристрою можливостей калібрування одержуваних інфрачервоних зображень та їх перерахунку на розподіли температури земної поверхні можна суттєво підвищити просторову розрізненість відновлених вихідних карт температури земної поверхні.

Суть методу полягає в тому, що в ньому застосовується наскрізне субпіксельне зміщення інфрачервоних зображень у всіх робочих спектральних діапазонах, вхідні інфрачервоні зображення перераховуються на розподіли температури земної поверхні за допомогою радіометричного калібрування та за ними відновлюються вихідні карти температури земної поверхні субпіксельного розділення [137].

4.3 Метод проектування атермального об'єктива для космічного тепловізора

Інфрачервоний космічний тепловізор експлуатуються в складних умовах довкілля. В першу чергу це відноситься до температурного діапазону, який може складати від -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$. Зміна температури викликає зміну конструктивних параметрів оптичних елементів, зміну лінійних розмірів механічних деталей несучої конструкції, зміну оптичних характеристик лінз[138]. Це у свою чергу призводить до терморозфокусування, появи додаткових термоаберацій і, як наслідок, погіршення якості зображення [139]. На орбіті підфокусування об'єктива ускладнено, тому використання методів пасивної оптичної атермалізації дозволяє досягти термостабілізації зображення фокусуючого вузла без додаткового ускладнення конструкції, забезпечує високу точність і надійність роботи об'єктива й зниження його масо- габаритних характеристик. При проектуванні об'єктивів ІЧ техніки

широко застосовуються трикомпонентні оптичні системи. Ці системи дозволяють одержати високу якість зображення без використання асферичних поверхонь. Запропоновано математичний апарат, що дозволяє проектувати атермалізовані ахроматичні ІЧ трикомпонентні оптичні системи з можливістю одночасної мінімізації аберацій зображення для випадку однорідного температурного розподілу в оптичній системі.

Метод розрахунку атермалізованого ахроматичного ІЧ трикомпонентного об'єктива заснований на тому, що при виборі матеріалів трьох лінз необхідно обчислити оптичні сили Φ_{1-3} компонентів, вирішуючи систему трьох рівнянь для виконання наступних умов:

- умова масштабу [138]

$$h_1\Phi_1 + h_2\Phi_2 + h_3\Phi_3 = 1; \quad (4.157)$$

- умова виправлення хроматизму положення

$$h_1^2\Phi_1/\nu_1 + h_2^2\Phi_2/\nu_2 + h_3^2\Phi_3/\nu_3 = 0; \quad (4.158)$$

– умова атермалізації, тобто збереження розміру заднього фокального відрізка $S'_{F'}$ у заданому температурному діапазоні за умови, що внесок деформації корпусу в термічне розфокусування малий

$$S'_{F'} = S'_{F'_{termo}} \quad \text{або} \quad h_3 = h_{3_{termo}}, \quad (4.159)$$

де h_{1-3} – висоти першого допоміжного нульового променя (ДНП) на оптичних компонентах системи, ν_{1-3} – коефіцієнти дисперсії матеріалів оптичних компонентів.

Розрахунки атермалізованого ахроматичного трикомпонентного ІЧ об'єктива ґрунтується на наступних вихідних даних:

– показники заломлення повітряних проміжків $n_1 = n_3 = n_5 = n_7 = 1$,

– показники заломлення матеріалів першого, другого й третього компонентів об'єктива n_2, n_4 і n_6 ,

– термооптичні сталі першого, другого й третього матеріалів компонентів об'єктива V_{t1-3} , де $V_t = \beta_\lambda / (n - 1) - \alpha$, β_λ – температурний коефіцієнт збільшення показника заломлення матеріалу на довжині хвилі

випромінювання λ , α – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу,

– відстані між оптичними компонентами d_1 і d_2 ,

– висота першого допоміжного променя (ДНП) на першому компоненті $h_1 = 1$,

– висота другого ДНП $y_1 = 0$.

Для системи з оптичною силою Φ_{SYS} , що складається із трьох нескінченно тонких лінз, що перебувають у повітрі, розмір заднього фокального відрізка $S'_{F'}$ дорівнює

$$S'_{F'} = \left[1 - \Phi_1(d_1 + d_2) - \Phi_2 d_2 (1 - \Phi_1 d_1) \right] / \Phi_{SYS}. \quad (4.160)$$

Щоб уникнути ускладнення виразу для зміни заднього фокального відрізка враховуємо вплив зміни температури тільки на оптичні сили компонентів і загальну оптичну силу системи. Оптичні сили компонентів при зміні температури на Δt градусів визначаються співвідношенням

$$\Phi_{i_{termo}} = \Phi_i (1 + V_{ti} \Delta t), \quad (4.161)$$

де i – номер компонента в оптичній системі.

Тоді оптична сила всієї системи з урахуванням температурної зміни оптичних сил окремих компонентів буде визначатися як

$$\begin{aligned} \Phi_{SYS_{termo}} = & \Phi_1 (1 + V_{t1} \Delta t) + \Phi_2 (1 + V_{t2} \Delta t) + \Phi_3 (1 + V_{t3} \Delta t) - \\ & - \Phi_1 (1 + V_{t1} \Delta t) d_1 \left[\Phi_2 (1 + V_{t2} \Delta t) + \Phi_3 (1 + V_{t3} \Delta t) \right] - \\ & - \Phi_3 (1 + V_{t3} \Delta t) d_2 \left[\Phi_1 (1 + V_{t1} \Delta t) + \Phi_2 (1 + V_{t2} \Delta t) - \right. \\ & \left. - \Phi_1 (1 + V_{t1} \Delta t) \Phi_2 (1 + V_{t21} \Delta t) d_1 \right]. \end{aligned} \quad (4.162)$$

З урахуванням того, що останній кут першого ДНП із оптичною віссю системи $\sigma_4 = 1$, маємо $S'_{F'} = h_3$. На підставі цієї рівності і рівнянь (4.159) – (4.162) отримаємо вираз розрахунку для температурної зміни заднього фокального відрізка

$$S'_{F'} - S'_{F'_{termo}} = \frac{h_3 - \left\{ 1 - \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)(d_1 + d_2) - \Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t)d_2 \times \right.}{\left. \times [1 - \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)d_1] \right\}} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t) + \Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t) + \Phi_3(1 + V_{t3}\Delta t) - \\ &- \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)d_1 [\Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t) + \Phi_3(1 + V_{t3}\Delta t)] - \\ &- \Phi_3(1 + V_{t3}\Delta t)d_2 \left[\Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t) + \Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t) - \right. \\ &\left. \left. - \Phi_1(1 + V_{t1}\Delta t)\Phi_2(1 + V_{t2}\Delta t)d_1 \right] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (4.163)$$

Висоти першого ДНП на другому та третьому компонентах системи визначаються виразами

$$h_2 = (1 - \Phi_1 d_1), \quad (4.164)$$

$$h_3 = [1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]. \quad (4.165)$$

З урахування співвідношень (4.164) та (4.165) умови масштабу та виправлення хроматизму положення оптичної системи з урахуванням відстаней між компонентами мають наступний вигляд:

$$\Phi_1 + (1 - \Phi_1 d_1)\Phi_2 + [1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]\Phi_3 = 1; \quad (4.166)$$

$$\Phi_1/\nu_1 + (1 - \Phi_1 d_1)^2 \Phi_2/\nu_2 + [1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]^2 \Phi_3/\nu_3 = 0. \quad (4.167)$$

Умова атермалізації, тобто збереження величини заднього фокального відрізка при зміні температури, з урахуванням відстаней між оптичними компонентами та виразів (4.164) і (4.165) буде мати наступний вигляд [139]

$$\begin{aligned}
& 1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1) - \\
& - \frac{\left\{ 1 - \Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) (d_1 + d_2) - \Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) d_2 [1 - \Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) d_1] \right\}}{\left\{ \begin{aligned} & \Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) + \Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) + \Phi_3 (1 - \Delta t V_{t3}) - \\ & - \Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) d_1 [\Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) + \Phi_3 (1 - \Delta t V_{t3})] - \\ & - \Phi_3 (1 - \Delta t V_{t3}) d_2 \left[\Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) + \Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) - \right. \\ & \left. \Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) \Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) d_1 \right] \end{aligned} \right\}} = 0.
\end{aligned}
\tag{4.168}$$

Розв'язуючи систему рівнянь (4.166) – (4.168) при заданих відстанях між компонентами можна знайти оптичні сили компонентів, що відповідають умовам ахроматизації та атермалізації в трикомпонентному об'єктиві.

Замість рівняння (4.167) в систему можна ввести умову виправлення хроматизму збільшення

$$\begin{aligned}
& y_1 \Phi_1 / \nu_1 + [y_1 - d_1 / (1 - \Phi_1 d_1)] (1 - \Phi_1 d_1)^2 \Phi_2 / \nu_2 + \\
& + \left\{ \frac{[y_1 - d_1 / (1 - \Phi_1 d_1) - d_2 / (1 - \Phi_1 d_1)]}{[1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]} \right\} \times \\
& \times [1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)]^2 \Phi_3 / \nu_3 = 0.
\end{aligned}
\tag{4.169}$$

Метод розрахунку атермалізованого ахроматичного трикомпонентного ІЧ об'єктиву містить наступні етапи:

1. По діаграмі $\nu - \nu V_t$ (рис. 4.14) вибирають комбінацію матеріалів компонентів, керуючись критерієм – площа трикутника, що утворюється трьома обраними оптичними матеріалами, повинна бути як можна більшою [140].

2. По заданих відстанях між компонентами (d_1 і d_2) із системи трьох нелінійних рівнянь (4.166–4.168) визначити значення оптичних сил Φ_1 , Φ_2 , і Φ_3 .

3. Обчислити висоти першого ДНП на другому і третьому компоненті (h_2 і h_3) по формулам (4.164) і (4.165). Комбінацію з $h_3 < 0.3$ використовувати

не рекомендується, оскільки в даному випадку відстань між останнім компонентом і площиною фотоприймача випромінювання буде дуже малою.

4. Визначити температурну зміну заднього фокального відрізка по формулі (4.163).

5. Отримати конструктивні параметри об'єктиву та проаналізувати рівень виправлення аберацій, величину температурної зміни заднього фокального відрізка, габарити об'єктива та можливості використання вибраних ІЧ матеріалів.

Кути першого й другого допоміжних променів α_i і β_i для системи, що складається із трьох тонких компонентів у повітрі, знаходимо за формулами:

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_{11} = \frac{\Phi_1}{n_2}; \quad \alpha_2 = \Phi_1; \quad \alpha_{21} = \left(\frac{1}{n_4} \right) \alpha_2 + h_2 \left(\frac{\Phi_2}{n_4} \right);$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 + h_2 \Phi_2;$$

$$\alpha_{31} = \left(\frac{1}{n_6} \right) \alpha_3 + h_3 \left(\frac{\Phi_3}{n_6} \right); \quad \alpha_4 = \alpha_3 + h_3 \Phi_3.$$

Кути другого допоміжного променю (рис. 4.15):

$$\beta_1 = 1; \quad \beta_{11} = \frac{1}{n_2}; \quad \beta_2 = 1; \quad \beta_{21} = \left(\frac{1}{n_4} \right) \beta_2 + y_2 \left(\frac{\Phi_2}{n_4} \right); \quad \beta_3 = \beta_2 + y_2 \Phi_2;$$

$$\beta_{31} = \left(\frac{1}{n_6} \right) \beta_3 + y_3 \left(\frac{\Phi_3}{n_6} \right); \quad \beta_4 = \beta_3 + y_3 \Phi_3.$$

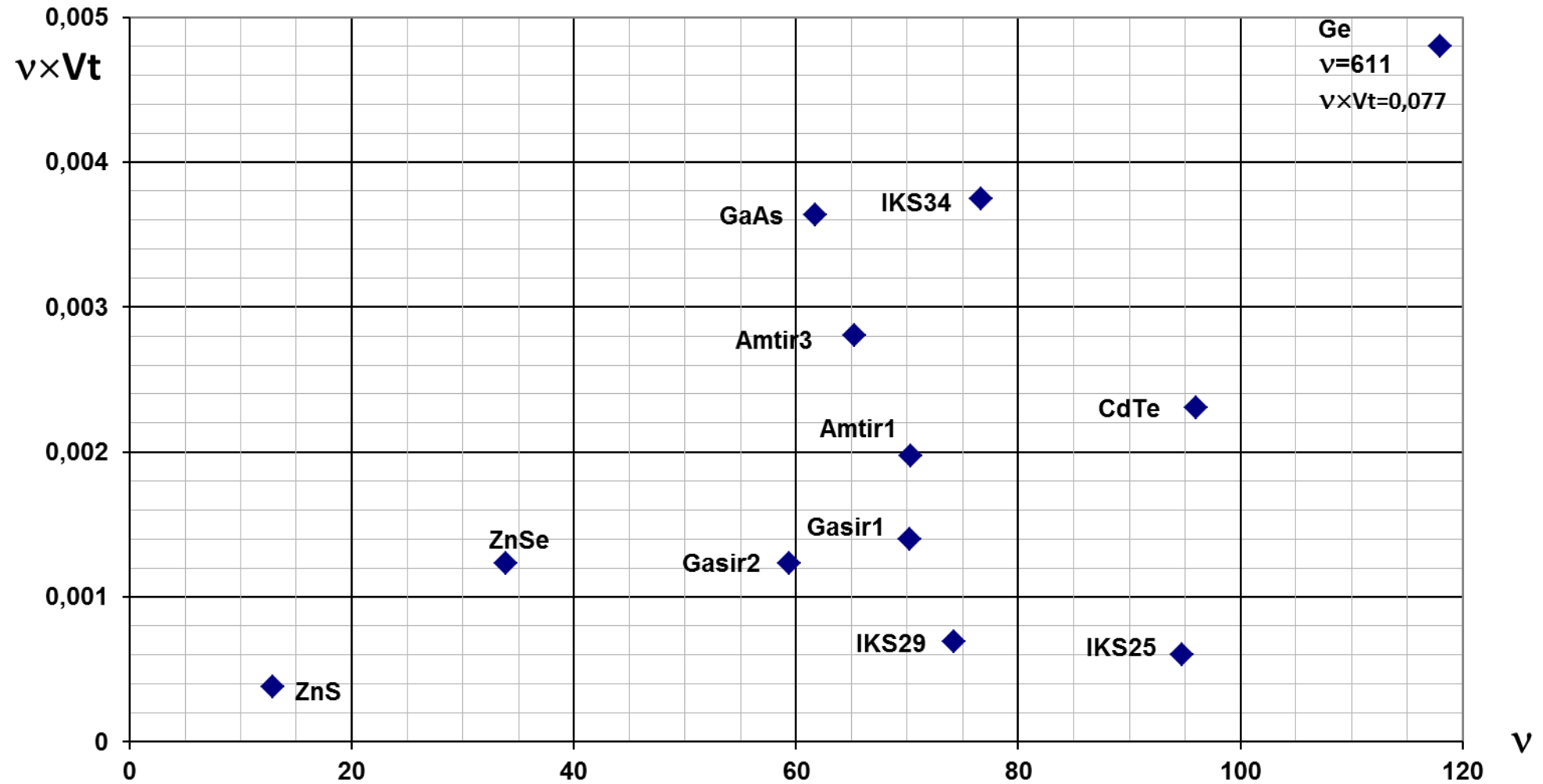


Рис. 4.14. Діаграма залежності дисперсії ІЧ матеріалів від добутку дисперсії і термооптичної сталої

Основні параметри системи Р і W знаходимо за формулами:

$$P_{11} = \left(\frac{\frac{\alpha_{11} - \alpha_1}{1} - \frac{1}{n_2}}{\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1}} \right)^2 \left(\frac{\alpha_{11}}{n_2} - \frac{\alpha_1}{n_1} \right); \quad P_2 = \left(\frac{\frac{\alpha_2 - \alpha_{11}}{1} - \frac{1}{n_3}}{\frac{1}{n_3} - \frac{1}{n_2}} \right)^2 \left(\frac{\alpha_2}{n_3} - \frac{\alpha_{11}}{n_2} \right);$$

$$P_{21} = \left(\frac{\frac{\alpha_{21} - \alpha_2}{1} - \frac{1}{n_4}}{\frac{1}{n_4} - \frac{1}{n_3}} \right)^2 \left(\frac{\alpha_{21}}{n_4} - \frac{\alpha_2}{n_3} \right); \quad P_3 = \left(\frac{\frac{\alpha_3 - \alpha_{21}}{1} - \frac{1}{n_5}}{\frac{1}{n_5} - \frac{1}{n_4}} \right)^2 \left(\frac{\alpha_3}{n_5} - \frac{\alpha_{21}}{n_4} \right);$$

$$P_{31} = \left(\frac{\frac{\alpha_{31} - \alpha_3}{1} - \frac{1}{n_6}}{\frac{1}{n_6} - \frac{1}{n_5}} \right)^2 \left(\frac{\alpha_{31}}{n_6} - \frac{\alpha_3}{n_5} \right); \quad P_4 = \left(\frac{\frac{\alpha_4 - \alpha_{31}}{1} - \frac{1}{n_7}}{\frac{1}{n_7} - \frac{1}{n_6}} \right)^2 \left(\frac{\alpha_4}{n_7} - \frac{\alpha_{31}}{n_6} \right);$$

$$W_{11} = \left(\frac{\frac{\alpha_{11} - \alpha_1}{1} - \frac{1}{n_2}}{\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1}} \right) \left(\frac{\alpha_{11}}{n_2} - \frac{\alpha_1}{n_1} \right); \quad W_2 = \left(\frac{\frac{\alpha_2 - \alpha_{11}}{1} - \frac{1}{n_3}}{\frac{1}{n_3} - \frac{1}{n_2}} \right) \left(\frac{\alpha_2}{n_3} - \frac{\alpha_{11}}{n_2} \right);$$

$$W_{21} = \left(\frac{\frac{\alpha_{21} - \alpha_2}{1} - \frac{1}{n_4}}{\frac{1}{n_4} - \frac{1}{n_3}} \right) \left(\frac{\alpha_{21}}{n_4} - \frac{\alpha_2}{n_3} \right); \quad W_3 = \left(\frac{\frac{\alpha_3 - \alpha_{21}}{1} - \frac{1}{n_5}}{\frac{1}{n_5} - \frac{1}{n_4}} \right) \left(\frac{\alpha_3}{n_5} - \frac{\alpha_{21}}{n_4} \right);$$

$$W_{31} = \left(\frac{\frac{\alpha_{31} - \alpha_3}{1} - \frac{1}{n_6}}{\frac{1}{n_6} - \frac{1}{n_5}} \right) \left(\frac{\alpha_{31}}{n_6} - \frac{\alpha_3}{n_5} \right); \quad W_4 = \left(\frac{\frac{\alpha_4 - \alpha_{31}}{1} - \frac{1}{n_7}}{\frac{1}{n_7} - \frac{1}{n_6}} \right) \left(\frac{\alpha_4}{n_7} - \frac{\alpha_{31}}{n_6} \right).$$

Для того, що б знайти радіуси компонентів, необхідно знайти кути першого допоміжного променя, зберігши при цьому висоти першого допоміжного променя й сили компонентів для виконання умови атермалізації. Кути першого й останнього відомі $\alpha_1 = 0$ й $\alpha_4 = 1$. Залишається п'ять невідомих $\alpha_{11}, \alpha_2, \alpha_{21}, \alpha_3$ і α_{31} , що дозволяє для складання певної системи рівнянь (число невідомих дорівнює числу рівнянь) використовувати п'ять

умов. Шостим невідомим може бути ексцентриситет на одній з поверхонь. Перші три умови - це рівність сил компонентів заданих радіусами знайденим оптичним силам

$$\begin{aligned} \left(\frac{\alpha_{11}n_2}{h_1} + \frac{(\alpha_2n_3 - \alpha_{11}n_2)}{h_1} \right) - \Phi_1 &= 0; \\ \left(\frac{(\alpha_{21}n_4 - \alpha_2n_3)}{h_2} + \frac{(\alpha_3n_5 - \alpha_{21}n_4)}{h_2} \right) - \Phi_2 &= 0; \\ \left(\frac{(\alpha_{31}n_6 - \alpha_3n_5)}{h_3} + \frac{(1 - \alpha_{31}n_6)}{h_3} \right) - \Phi_3 &= 0. \end{aligned}$$

Четвертою й п'ятою умовою можуть бути умови виправлення сферичної аберації і коми. Вираз для першої й другої суми Зейделя для системи, що має асферичні поверхні:

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum h_k (P_k + B_k) = 0; \\ B &= b \left(\frac{n_{k+1}\alpha_{k+1} - n_k\alpha_k}{n_{k+1} - n_k} \right)^3 (n_{k+1} - n_k), \end{aligned}$$

де b – ексцентриситет поверхні (для сферичної поверхні $b = 0$).

$$S_2 = \sum y_k (P_k + B_k) + \sum W_k = 0.$$

Після того, як знайдені кути виходячи з перерахованих вище умов можна знайти радіуси лінз, скориставшись формулами:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{(n_2 - n_1)}{(\alpha_{11}n_2 - \alpha_1n_1)} h_1; & r_2 &= \frac{(n_3 - n_2)}{(\alpha_2n_3 - \alpha_{11}n_2)} h_1; \\ r_3 &= \frac{(n_4 - n_3)}{(\alpha_{21}n_4 - \alpha_2n_3)} h_2; & r_4 &= \frac{(n_5 - n_4)}{(\alpha_3n_5 - \alpha_{21}n_4)} h_2; \\ r_5 &= \frac{(n_6 - n_5)}{(\alpha_{31}n_6 - \alpha_3n_5)} h_3; & r_6 &= \frac{(n_7 - n_6)}{(\alpha_4n_7 - \alpha_{31}n_6)} h_3. \end{aligned}$$

Використовуючи запропонований метод було розроблено трилінзовий атермальний світлосильний об'єктив для інфрачервоного діапазону спектру,

що містить три компоненти у вигляді менісків (рис. 4.15 а). Перший меніск виконано з додатною оптичною силою φ_1 , другий – з від’ємною оптичною силою φ_2 , третій – з додатною оптичною силою φ_3 . Лінзи виготовлені з різних матеріалів, які задовольняють умовам:

$$\begin{aligned} 74 < v_1 < 95; & \quad v_2 \leq 34; & \quad v_3 > v_2; \\ 6,4 \times 10^{-6} < V_1 < 9,4 \times 10^{-6}; & \quad 29,7 \times 10^{-6} < V_2 < 36,5 \times 10^{-6}, \end{aligned}$$

де v_1, v_2, v_3 – коефіцієнти дисперсії трьох компонентів, V_1, V_2 – термооптичні сталі першого та другого компонентів. За цих умов оптичні сили компонентів задовольняють умовам [141]:

$$\begin{aligned} 0,72 < \frac{\varphi_1}{\varphi} < 1,6; & \quad 0,12 < \left| \frac{\varphi_2}{\varphi} \right| < 1,6; \\ 0,55 < \frac{\varphi_{1,2}}{\varphi} < 0,70; & \quad 1,05 < \frac{\varphi_3}{\varphi} < 1,43, \end{aligned}$$

де φ – оптична сила об’єктива, $\varphi_{1,2}$ – еквівалентна оптична сила першого та другого компонентів. За цих умов відстань d між другим та третім компонентами задовольняє умові: $0,61 < d\varphi < 0,95$.

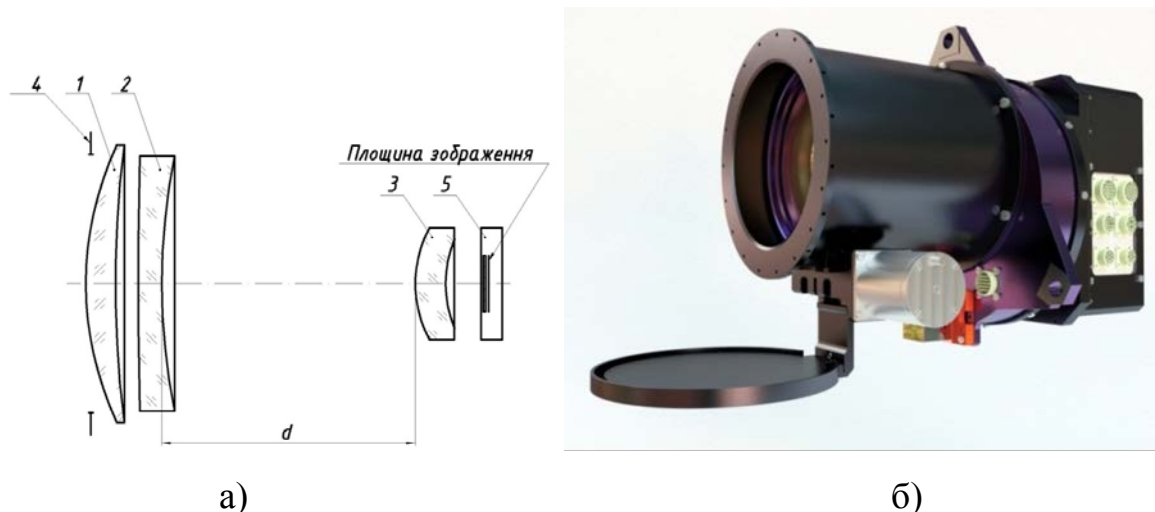


Рис. 4.15. Оптична схема та світлина атермального інфрачервоного об’єктива

За запропонованим методом було розраховано та виготовлено об’єктив інфрачервоного сканеру (рис. 4.15 б), що складається з трьох типів скла: ІКС-25, селенід цинку і германію. Об’єктив має фокусну відстань $f' = 112$ мм,

відносний отвір 1:1 і може працювати без терморозфокусування в діапазоні температур від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$ [142].

4.4 Удосконалення методу дистанційного вимірювання температури земної поверхні інфрачервоним спектро радіометром космічного базування

Принциповою відмінністю інфрачервоного спектро радіометра від звичайної знімальної апаратури є можливість одержувати фізичні характеристики об'єктів і покриттів земної поверхні – температуру та власний коефіцієнт теплового випромінювання [143]. Однак точність отриманих характеристик залежить від багатьох факторів і потребує опрацювання нових методів [144].

Можливість дистанційного визначення температури базується на законі теплового випромінювання Планка:

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) M(\lambda, T) = \frac{\varepsilon(\lambda) c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (4.170)$$

де $L(\lambda, T)$ – спектральна щільність енергетичної яскравості земної поверхні, $\varepsilon(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання, $M(\lambda, T)$ – функція Планка (спектральна щільність енергетичної яскравості абсолютно чорного тіла), $c_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ і $c_2 = \frac{hc}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ – перша і друга константи закону Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – стала Планка, $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – швидкість світла у вакуумі, $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – стала Больцмана, λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання [145].

Температуру можна знайти із рівняння (4.170):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda) c_1}{\lambda^5 L} + 1\right)}. \quad (4.171)$$

Теплове випромінювання підкоряється закону зміщення Віна

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (4.172)$$

де λ_{\max} – довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної щільності енергетичної яскравості теплового випромінювання, $b = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ – стала Віна. Для типової температури земної поверхні 25°C максимум

випромінювання відповідає $\lambda_{\max} = 9,72$ мкм, тобто саме у дальньому інфрачервоному діапазоні спектру.

Спектральна щільність енергетичної яскравості L_i на апертурі інфрачервоного сенсора в спектральному каналі i на верхній межі атмосфери описується інтегральним рівнянням радіаційного переносу:

$$L_i = \varepsilon_i \tau_i \int M(\lambda, T) S_i(\lambda) d\lambda + L_i^{\uparrow} + (1 - \varepsilon_i) \tau_i L_i^{\downarrow}, \quad (4.173)$$

де ε_i – коефіцієнт теплового випромінювання в i -му спектральному каналі, τ_i – коефіцієнт пропускання атмосфери в i -му спектральному каналі, $S_i(\lambda)$ – нормована спектральна чутливість сенсора в i -му спектральному каналі, L_i^{\uparrow} і L_i^{\downarrow} – спектральна щільність енергетичної яскравості випромінювання в напрямку від поверхні Землі і до поверхні Землі в i -му спектральному каналі відповідно [9].

Основним чинником, що обумовлює атмосферний вплив на радіаційний перенос в дальньому інфрачервоному діапазоні, виступає водяна пара. Крім того, τ_i та L_i^{\uparrow} , а відповідно і зареєстрована яркісна температура, залежать від кута візування сенсора. Отже, при визначенні фізичних характеристик земної поверхні за матеріалами інфрачервоного зондування необхідно враховувати атмосферні, кутові та емісійні невизначеності в рівнянні радіаційного переносу. І якщо два перші може бути усунено чи послаблено за допомогою додаткових орбітальних або наземних вимірювань, то невизначеність спектрального коефіцієнта теплового випромінювання *завжди* потребує певних апріорних припущень [146].

Вся різноманітність відомих методів визначення температури та коефіцієнта теплового випромінювання поділяється на дві принципово різні групи: методи, що використовують моделі радіаційного переносу в тому чи іншому вигляді, та методи, що використовують моделі відокремлення температури та коефіцієнта теплового випромінювання. Обидві групи потребують знання або безпосереднє коефіцієнта теплового випромінювання поверхні, що спостерігається, або певних інших характеристик земної

поверхні, які дозволяють його оцінити. Першу групу методів може бути реалізовано навіть для одного робочого спектрального діапазону, друга, як правило, потребує не менше двох діапазонів [147].

Метод Single Channel Method (SCM) використовує рівняння радіаційного переносу (4.173) при спостереженні в єдиному інфрачервоному спектральному каналі [7,148]. Метод вимагає знання температури і вологовмісту атмосфери з високою точністю, а також знання коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні в кожному пікселі інфрачервоного зображення. Зміна коефіцієнта теплового випромінювання на 0,01 може привести до зміни оцінки температури земної поверхні аж на 2 К [149]. Для розв'язання рівнянь радіаційного переносу залучаються складні моделі атмосфери, найчастіше за все – MODTRAN [150].

Метод Split Window Technique (SWT) спирається на одночасну реєстрацію декількох інфрачервоних зображень в різних спектральних каналах в межах дальнього інфрачервоного діапазону [151]. Метод SWT використовує різницю випромінювальних властивостей земної поверхні та пропускання атмосфери в цих каналах. Передбачається розділення повного потоку інфрачервоного випромінювання на дві частини: поверхневу та атмосферну. В цьому випадку рівняння радіаційного переносу записується у такому вигляді:

$$L(\lambda) = \tau(\lambda) M(\lambda, T) + [1-\tau(\lambda)] M(\lambda, T_A) , \quad (4.174)$$

де T_A – яскравісна температура атмосфери.

Зазвичай вимірювання спрощують до двох спектральних каналів i та j , для яких температура визначається за рівнянням

$$T \cong T_i + a (T_i - T_j) + b , \quad (4.175)$$

де T_i і T_j – яскравісні температури в спектральних каналах, a і b – параметри, що залежать від атмосферних умов та типу спектральної випромінювальної здатності земної поверхні [152].

Цей метод є досить ефективним для визначення температури морської

поверхні, для якої $\varepsilon \approx 1$ [153], проте для суходолу він потребує додаткових модифікацій [154].

Метод Temperature and Emissivity Separation (TES) дозволяє одержувати одразу як температуру, так і коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні при багатоспектральному ІЧ зондуванні [155]. Метод використовує атмосферно-скореговані величини яскравості L_i^{\uparrow} і L_i^{\downarrow} ІЧ випромінювання на рівні поверхні Землі. Метод базується на напівемпіричному зв'язку, визначеному в лабораторних експериментах, між мінімальним значенням коефіцієнта теплового випромінювання ε_{\min} та спектральною різницею між максимальним та мінімальним значеннями коефіцієнта теплового випромінювання $\Delta\varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ в межах інфрачервоного зображення, що спостерігається:

$$\varepsilon_{\min} \approx 0,994 - 0,687\Delta\varepsilon_{\max}^{0,737}, \quad (4.176)$$

який виконується з 95 % достовірністю в інтервалі $\varepsilon_{\min} \pm 0,02$ [156].

Після відновлення розподілу коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні стає можливим розрахувати температуру за оберненою формулою Планка (4.171) в межах всієї області спостереження [157].

Існує іще багато методів, наприклад: визначення коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні за допомогою вегетаційного індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який ґрунтується на можливості розділення рослинного покриву від відкритих ґрунтів та штучних поверхонь за пороговими значеннями NDVI [158, 159]; алгоритм RM-NN (Radiative Transfer Model – Neural Network) комбінує моделювання температури земної поверхні рівнянням радіаційного переносу з усуненням невизначеності коефіцієнтів випромінювання за допомогою зворотного розповсюдження в штучній нейронній мережі [160] та інші. Але для інфрачервоної космічної системи дистанційного зондування, яка має декілька спектральних каналів, найбільш підходить метод TES.

При застосуванні інфрачервоного спектро радіометра без підтримки матеріалами багатоспектрального зондування у видимому та ближньому

інфрачервоному діапазонах, наприклад, вночі, задачу розділення фізичної температури та коефіцієнта теплового випромінювання може бути розв'язано за рахунок спільної обробки результатів інфрачервоного зондування в декількох спектральних діапазонах водночас. Для двох спектральних діапазонів для цього зазвичай застосовують метод SWT, а при більшому їх числі – метод TES, який здається найбільш досконалим серед інших методів розділення температури та коефіцієнта теплового випромінювання в багатоспектральних інфрачервоних системах спостереження [161]. Оскільки інфрачервоний спектро радіометр передбачається обладнати 3-5 окремими спектральними каналами [162], застосування метода TES для обробки матеріалів його знімання є виправданим.

Алгоритм TES послідовно комбінує три групи операцій: нормування коефіцієнтів теплового випромінювання в різних спектральних каналах

$$\beta_i = \frac{\varepsilon_i}{\sum_j \varepsilon_j} , \quad (4.177)$$

де β_i – нормований коефіцієнт теплового випромінювання в i -му спектральному каналі; обчислення максимальної нормованої різниці MMD (Minimum Maximum Difference) $\Delta\beta_{\max} = \max_i \beta_i - \min_i \beta_i$; визначення абсолютної величини мінімального значення коефіцієнта теплового випромінювання ε_{\min} , виходячи з емпіричної залежності, яка має вигляд

$$\varepsilon_{\min} \approx a + b (\Delta\beta_{\max})^r , \quad (4.178)$$

де a , b і r – коефіцієнти показникової регресії, які одержуються експериментально для кожного конкретного багатоспектрального інфрачервоного радіометра окремо [163]. Після отримання ключової величини ε_{\min} стає можливим зворотне обчислення абсолютних значень коефіцієнтів теплового випромінювання із (4.177):

$$\varepsilon_i = \beta_i \frac{\varepsilon_{\min}}{\min_j \beta_j} . \quad (4.179)$$

Таким чином, розглянутий метод дозволяє розділити фізичну температуру та коефіцієнт теплового випромінювання і тому температуру можна легко обчислити за оберненою формулою Планка (4.171).

Нерозкритим залишилося питання одержання першого наближення значень коефіцієнтів теплового випромінювання ε_i для розрахунку в співвідношенні (4.177). Для цього використовується спеціальний розрахунковий модуль NEM (Normalized Emissivity Module). Ідея полягає у початковому заданні максимально припустимої величини коефіцієнта теплового випромінювання (зазвичай $\varepsilon_{\max} = 0,97 \dots 0,99$) у всіх робочих спектральних діапазонах спектро радіометра та ітераційному уточненні вектору коефіцієнтів теплового випромінювання ε_i шляхом перерахунку за оберненою формулою Планка у припущенні, що фізична температура дорівнює максимальній серед визначених у всіх спектральних діапазонах [164]. Ітераційна процедура швидко збігається, при цьому досягається усунення впливу ефекту атмосферного випромінювання L_i^\downarrow , а отримані в результаті значення коефіцієнтів теплового випромінювання застосовуються як перше наближення в алгоритмі TES для нормування в рівнянні (4.177).

Порядок визначення температури та коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні за результатами багатоспектрального зондування тільки в дальньому інфрачервоному діапазоні пояснюється схемою, що наведена на рис. 4.17.

Багатоспектральне інфрачервоне зображення (TIR) із зареєстрованих цифрових кодів (DN_i) за калібрувальними коефіцієнтами (Cal_i) перераховуються на спектральну щільність енергетичної яскравості на апертурі сенсора (L_i). Далі в модулі NEM на основі початкового значення коефіцієнта теплового випромінювання ε_{\max} за оберненою формулою Планка $T_i(L_i, \varepsilon_{\max})$ ітеративно розраховується перше наближення вектору коефіцієнтів теплового випромінювання у всіх робочих спектральних діапазонах спектро радіометра $\varepsilon_i(L_i, T^*)$. Ці коефіцієнти нормуються ($\beta_i = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon}$) і по них за

формулою (4.178) обчислюється значення мінімального коефіцієнта теплового випромінювання ε_{\min} , а за ним згідно (4.179) – всі інші значення ε_i . Знаючи коефіцієнти теплового випромінювання у всіх робочих спектральних діапазонах знов-таки за оберненою формулою Планка розраховуються фізичні температури у всіх робочих спектральних діапазонах $T_i(L_i, \varepsilon_i)$. Якщо розбіжності отриманих температур невеликі (не перевищують наперед заданого порога T^*), результати роботи алгоритму – вектор коефіцієнтів теплового випромінювання ε_i та фізична температура земної поверхні T – виводяться, якщо ні – отримані значення ε_i використовуються як початкові в наступній ітерації TES [165].

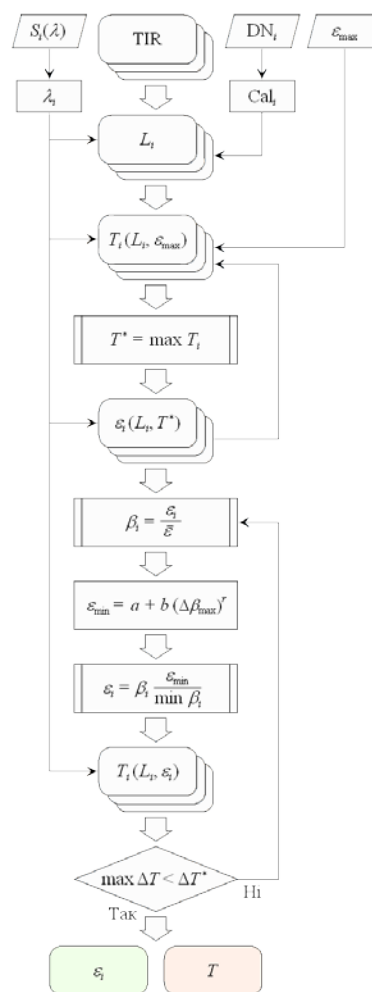


Рис. 4.17. Діаграма потоків даних при визначення температури та коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні за методом TES

Вплив атмосфери при визначенні фізичних характеристик земної поверхні за матеріалами інфрачервоного знімання описується трьома атмосферними функціями [166]

$$\begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} w^2 \\ w \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4.180)$$

де c_{11}, \dots, c_{33} – коефіцієнти, що залежать від спектральної чутливості інфрачервоного сенсора.

Коефіцієнти можна розрахувати за допомогою чисельного моделювання на основі наявних баз даних стандартної атмосфери. Ці функції залежать від пропускання атмосфери в робочому спектральному діапазоні τ , а також від спектральної щільності енергетичної яскравості L^\uparrow та L^\downarrow інфрачервоного випромінювання і визначаються як [167]:

$$\psi_1 \equiv \frac{1}{\tau}, \quad \psi_2 \equiv -L^\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau}, \quad \psi_3 \equiv L^\downarrow, \quad (4.181)$$

що безпосередньо впливає з інтегрального рівняння радіаційного переносу (4.173).

У свою чергу, величини τ , L^\uparrow та L^\downarrow визначаються багатьма чинниками, основними з яких є вміст водяної пари w в атмосфері та її температура T_A [168]. В разі використання апроксимації поліномом другого порядку модель (4.180) зазнає суттєвого ускладнення:

$$\psi = C \times [(w^2 \ w \ 1)^T \times (T_A^2 \ T_A \ 1)] , \quad (4.182)$$

де розмір матриці коефіцієнтів C становитиме 9×3 . Значення цих коефіцієнтів може бути оцінено застосуванням моделей радіаційного переносу, таких як MODTRAN виходячи з необхідних вхідних атмосферних полів – температури повітря, вологовмісту, геодезичних висот місцевості, а також спектральної чутливості сенсорів робочих спектральних діапазонів інфрачервоного спектро радіометра [171]. Існує значна кількість прецизійних моделей атмосферних параметрів, які адаптовано до різних типів і станів

атмосфери. Такі моделі дозволяють оцінювати широкий спектр профілів атмосферних параметрів та їх тривимірних профілів [170].

Одним з можливих джерел оперативних даних про стан атмосфери під час інфрачервоного зондування є супутникова система спостереження Землі EOS з інфрачервоним спектро радіометром низького розділення MODIS. Система EOS/MODIS забезпечує щоденне знімання глобального розподілу атмосферних профілів температури, вологовмісту, аерозолів, озону та домішкових газів [171]. Використання безкоштовних інформаційних продуктів EOS/MODIS, які отримуються синхронно з інфрачервоним зондуванням перспективного супутникового спектро радіометра є реальним шляхом підвищення точності вимірювань фізичних характеристик земної поверхні.

Висновки до розділу 4

Удосконалена узагальнена фізико-математична модель інфрачервоної системи спостереження, яка враховує особливості її застосування на космічних апаратах. Результати дослідження цієї моделі свідчать про те, що

1. При моделюванні тепловізійної системи спостереження з метою підвищення якості зображення необхідно:

- 1.1. Узгодити радіус кружка розсіювання об'єктива і період мікроболометричної матриці. Пропонується два критерія узгодження: рівність МПФ об'єктива и МБМ на частоті Найквіста; рівність МПФ об'єктива і МБМ на заданій просторовій частоті. Дослідження показали, що узгодження за другим критерієм дозволяє підвищити контраст зображення на 7,6%.

- 1.2. Використовувати загальноприйняті характеристики і параметри тепловизионних приладів різного призначення з урахуванням особливостей космічних тепловізорів. Отримано нове рівняння для розрахунку основної характеристики космічного тепловізора – мінімальної роздільної різниці температур, яке не враховує дисплей і спостерігача.

1.3. Запропоновано для підвищення просторової роздільної здатності тепловізійної камери метод реєстрації та обробки зображень з субпіксельним зміщенням. Для низьких просторових частот застосування субпіксельної реєстрації не покращує $MRTD$, але з ростом просторової частоти вплив субпіксельної реєстрації на $MRTD$ зростає, досягаючи на частоті Найквіста відносного значення $k_{MRTD}(\nu_x) = 1,41$.

1.4. Запропоновано новий метод для підвищення просторового розділення в ІЧ багатоспектральних космічних ОЕС ДЗЗ, який полягає в сумісній обробці субпіксельно зміщених зображень від різних спектральних діапазонів, які попередньо перераховані на єдину фізичну величину, незалежну від спектрального діапазону, температуру Земної поверхні.

2. Розроблено метод проектування атермального об'єктива для тепловізійної камери космічного базування, застосування якого дозволило розрахувати трилінзовий об'єктив, що має фокусну відстань 112 мм, відносний отвір 1:1 і може працювати без терморозфокусування в діапазоні температур від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

РОЗДІЛ 5

ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ГІПЕРСПЕКТРОМЕТРІВ

5.1 Принципи побудови і особливості використання гіперспектрометрів

Показниками інформаційних можливостей ОЕС ДЗЗ є просторове розділення (розмір пікселя на місцевості), енергетичне розділення, спектральне розділення у робочому спектральному діапазоні та смуга захвату [10].

Головною особливістю спектрометрії, що формує зображення, є можливість отримати зображення в більш ніж 100 спектральних каналах. У роботах [11,172–175] відзначається інтенсивний розвиток відеоспектральної зйомки закордоном і робиться висновок про її виняткові перспективи, як принципово нового напрямку в методах дистанційного аерокосмічного зондування Землі.

Відеоспектрометрія дозволяє отримувати інформацію про оптимальні вузькі спектральні інтервали для виділення конкретного об'єкта і виявляти малоконтрастні об'єкти й явища [173].

Недоліками гіперспектральної зйомки є висока вартість, складність і інформаційна надлишковість. Обробка і навіть елементарний перегляд гіперспектральних зображень вимагають величезних обчислювальних витрат і значного об'єму пам'яті. Складною проблемою є також відбір інформативних спектральних каналів, важливих для розв'язання конкретного завдання. Оптимальний вибір спектральних каналів і ефективна інтерпретація гіперспектральних зображень потребують принципово нових методів обробки й аналізу таких зображень [176,177].

Характеристики об'єктів гіперспектральної зйомки підрозділяються на геометричні і спектральні. До геометричних характеристик відносяться характерна детальність d_0 , необхідна для виявлення об'єктів на зображеннях, і типовий розмір L , необхідний для проведення цілісного аналізу зображень. До спектральних характеристик відносяться криві спектрального коефіцієнта відбиття $\rho(\lambda)$ і похідні від них дискретні спектральні сигнатури, сформовані гіперспектрометром, а також процентний склад стандартних “чистих

спектрів” (endmembers) у загальній спектральній характеристиці. Основними для гіперспектральної зйомки є спектральні характеристики об'єктів, і саме вони визначають можливості супутникового гіперспектрометра розв'язання тематичних завдань ДЗЗ. Кількісно ці можливості описуються інформативністю гіперспектральних зображень [178]. Геометричні ж характеристики об'єктів відіграють допоміжну роль, і, в основному, накладають обмеження на можливості розв'язку тих або інших тематичних завдань, виходячи із ширини смуги огляду B і забезпечуваного лінійного розділення на місцевості d гіперспектрометра. Кількісно ці обмеження описуються ймовірністю P_0 правильного виявлення відповідних об'єктів на зображеннях [179].

Інформативність гіперспектральних космічних зображень S описується обсягом або часткою корисної інформації в повному її обсязі – інформаційній ємності зображення. Корисна інформація, що міститься в космічному зображенні, визначається її значимістю для розв'язання конкретного тематичного завдання. Тому інформативність повинна кількісно оцінюватися так само, як і інформація, і вимірюватися в одиницях інформації, наприклад, у бітах.

Розв'язання типового тематичного завдання складається з наступних складових: класифікація необхідних об'єктів по спектральним характеристикам (основна) і по просторовому розділенню та смузі огляду (додаткові). Загальна схема оцінки можливостей розв'язання типових тематичних завдань ДЗЗ за допомогою гіперспектральної космічної зйомки повинна включати два етапи:

1. Накладання обмежень на розв'язок тематичного завдання по геометричним характеристикам об'єктів зйомки, виходячи із просторових показників гіперспектрального сенсора.

2. Обчислення інформативності гіперспектральних космічних зображень по спектральним характеристикам об'єктів тематичного завдання виходячи із складу спектральних каналів оцінюваного гіперспектрального сенсора [180].

Якщо по спектральним характеристикам об'єктів зйомки забезпечується підсумкова інформативність S_0 , то просторові характеристики накладуть на неї обмеження по просторовому розділенню на місцевості d і ширині смуги огляду B . Обмеження інформативності по просторовому

розділенню описується ймовірністю правильного виявлення об'єкта зйомки [181], а обмеження по ширині смуги огляду описується частиною площі необхідного району зйомки, яку реєструє гіперспектрометр. Підсумкова інформативність гіперспектральної зйомки C складе

$$C = C_0 \frac{B}{L} \exp \left[\ln \alpha \frac{w_{\max}}{\Delta w} \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \right], \quad (5.1)$$

де v_{\max} – кількість бінарних розрядів, якими кодується цифрове космічне зображення, Δw – кількість бінарних розрядів, необхідних для кодування різниці радіометричних рівнів об'єкта і фону на цифровому зображенні, α – забезпечувана ймовірність (рівень значимості).

Із практичної точки зору розв'язання тематичних завдань ДЗЗ за даними гіперспектральної зйомки зводиться до класифікації відповідних багатомірних цифрових зображень, а класифікація, у свою чергу, – до поділу класів об'єктів у відповідному просторі ознак. Тому вихідним для кількісної оцінки інформативності по спектральних характеристиках об'єктів є перелік розв'язуваних тематичних завдань ДЗЗ із вказівкою об'єктів, які класифікуються, таких, як лісові масиви, сільськогосподарські насадження, водні поверхні, урбанізовані або промислові території, зони надзвичайних ситуацій – для кожного завдання.

Інформативність по спектральним характеристикам може бути описана наступним співвідношенням [182]:

$$C_0(\lambda) = D(\lambda) \log_2[1 + \psi(\lambda)], \quad (5.2)$$

де $D(\lambda)$ – взаємна інформація Кульбака-Лейблера між ймовірнісними розподілами спектральних сигналів; $\psi(\lambda)$ – еквівалентне відношення “сигнал-шум”.

Співвідношення (5.1) і 5.(2) дозволяють оцінювати інформативність кожного спектрального діапазону окремо. Однак дослідження показують, що шляхом спільного використання декількох певним чином відібраних спектральних діапазонів можна забезпечити рівень інформативності значно більш високий, ніж той, що розраховується по звичайному адитивному правилу. У такий спосіб реалізується так званий синергетичний ефект багатоспектральності [183].

Для пошуку оптимальної по інформативності комбінації спектральних діапазонів застосовується максимізація цільової функції (5.2):

$$\{\lambda\}^* = \operatorname{argmax} C_0(\lambda). \quad (5.3)$$

Оптимізація вибору підмножини спектральних діапазонів – математичне завдання знаходження кращого набору спектральних діапазонів ґрунтується критерію (5.2). При заздалегідь відомих спектральних сигнатурах об'єктів це завдання аналітичної безумовної дискретної оптимізації. Для оптимізації набору спектральних діапазонів гіперспектрометра зазвичай використовується мультістарт псевдоградієнтного пошуку на регулярних ґратах у просторі бінарних векторів вибору спектральних діапазонів [184]. Алгоритм оптимізації складу спектральних діапазонів супутникового гіперспектрометра по інформативності при розв'язанні тематичного завдання пояснюється схемою, наведеної на рис. 5.1.

В результаті проведених досліджень сформульовані попередні технічні вимоги до перспективного гіперспектрометра, як складового елемента бортового комплексу одного з майбутніх українських супутників ДЗЗ [185].

Розрахункові технічні характеристики перспективного супутникового гіперспектрометра:

- робочий спектральний діапазон – 0,4-2,5 мкм;
- спектральне розділення – 6-30 нм;
- кількість спектральних каналів – 150;
- просторове розділення на місцевості – 45 м;
- ширина смуги огляду – 46 км;
- вихідний формат зображень – цифровий (10 біт на діапазон);
- кількість конструктивних блоків спектрометра – 2;
- робочі спектральні діапазони конструктивних блоків – 0,4-0,9 і 0,9-2,5 мкм.

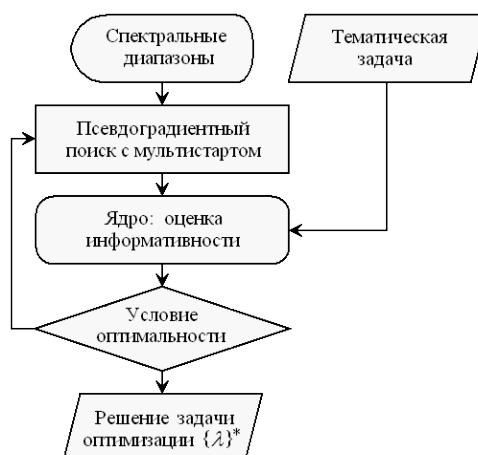


Рис. 5.1. Схема алгоритму оптимізації складу спектральних діапазонів гіперспектрометра по інформативності

Досліджувалася усереднена по різним тематичним завданням інформативність спектральних діапазонів перспективного супутникового гіперспектрометра з оптимальними параметрами. Результати досліджень ілюструються діаграмою на рис. 5.2.

Повна інформативність перспективного супутникового гіперспектрометра з врахуванням як спектральних, так і просторових характеристик для різних груп тематичних завдань, наведена в табл. 5.1. [186].

Групами тематичних завдань найбільш ефективного застосування перспективного супутникового гіперспектрометра можуть стати геологія і геологорозвідка (зокрема, аналіз гірських порід і пошук корисних копалин), землекористування (відносно стану урбанізованих і промислових територій) і надзвичайні ситуації (ті, що не вимагають оперативного моніторингу, наприклад, прогнозування природних і техногенних катастроф, оцінка екологічних загроз).

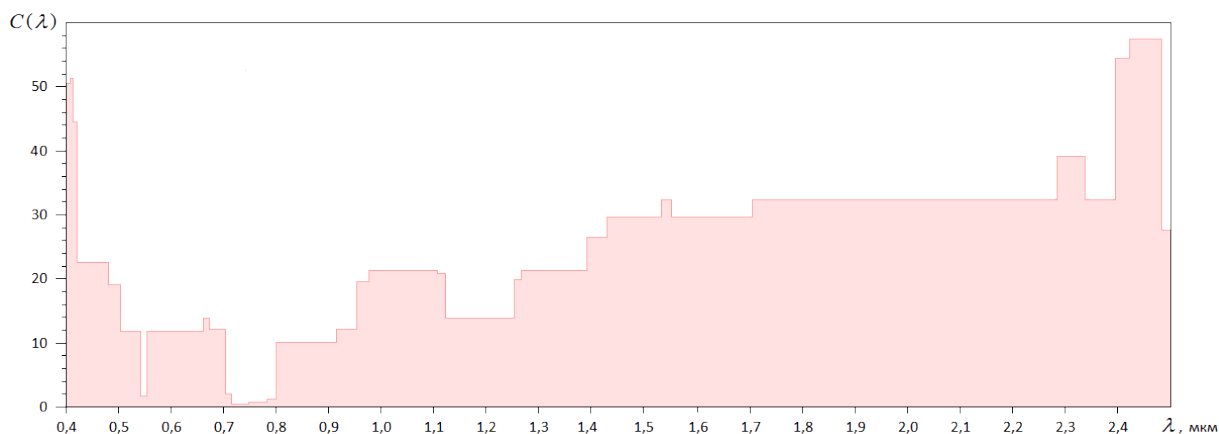


Рис. 5.2. Усереднена інформативність оптимальних комбінацій спектральних діапазонів перспективного супутникового гіперспектрометра

Таблиця 5.1.

Інформативність перспективного супутникового гіперспектрометра при розв'язанні типових тематичних завдань

Код	Тематичне завдання	Інформативність, біт/гіперпіксель
1	Геологія і геологорозвідка	68
2	Землекористування	57
3	Сільське господарство	14
4	Екосистеми і лісове господарство	18
5	Океанографія і прибережні зони	8
6	Гідрографія і водні ресурси	17
7	Метеорологія і кліматологія	7
8	Надзвичайні ситуації	95

Таким чином, розроблені підходи по кількісній оцінці можливостей розв'язку типових тематичних завдань ДЗЗ із застосуванням супутникових гіперспектрометрів забезпечують їхнє правильне позиціонування в системі отримання і використання космічної інформації, комплексування з іншими дистанційними даними, зокрема, даними далекого інфрачервоного діапазону і радіолокаційними [187].

Найбільша ефективність досягається при комплексному використанні оптико-електронних сенсорів ДЗЗ. Основним напрямком комплексування даних бортових сенсорів можуть бути підвищення просторового розділення

гіперспектральних зображень до просторового розділення зображень багатоспектральних сканерів, підвищення спектрального розділення в багатоспектральних зображеннях і гіперспектральних зображеннях та спільна обробка багатоспектральних і гіперспектральних космічних зображень при аналізі матеріалів космічної зйомки [188].

Реалізація нового пристрою підвищення просторового розділення (рис. 5.3) починається з того, що формується комплект багатоспектральних аерокосмічних зображень високого і низького просторового розділення однієї тієї ж сцени від гіпеспектрометра та багатоспектрального сканеру. В цьому комплекті кожному елементу розділення багатоспектрального аерокосмічного зображення низького розділення поставлено у відповідність певну кількість елементів розділення багатоспектрального аерокосмічного зображення високого розділення. Ці елементи просторово перекриваються у попиксельній послідовності через буфери 3, 4 портів 1 і 2 мікроконтролера і надходять до шини даних 5, де зберігаються в оперативній пам'яті 9 та надходять в аналізатор 21.

Результатом роботи аналізатора 21 є набір спектрів об'єктів сцени, що відібрані з постійного запам'ятовуючого пристрою аналізатора 22, попередньо записаних в оперативній пам'яті аналізатора 23 і оброблених в суматорі аналізатора 24.

Перераховані суматором аналізатора 24 спектральні сигнатури вказаних об'єктів на багатоспектральних аерокосмічних зображеннях високого і низького розділення аналізатор 21 передає в оперативну пам'ять 9. Інтерфейс пам'яті 11 забезпечує доступ до програмованої пам'яті команд 8 та оперативної пам'яті 9 через шину даних 5, шину адресу 6 та шину команд 7.

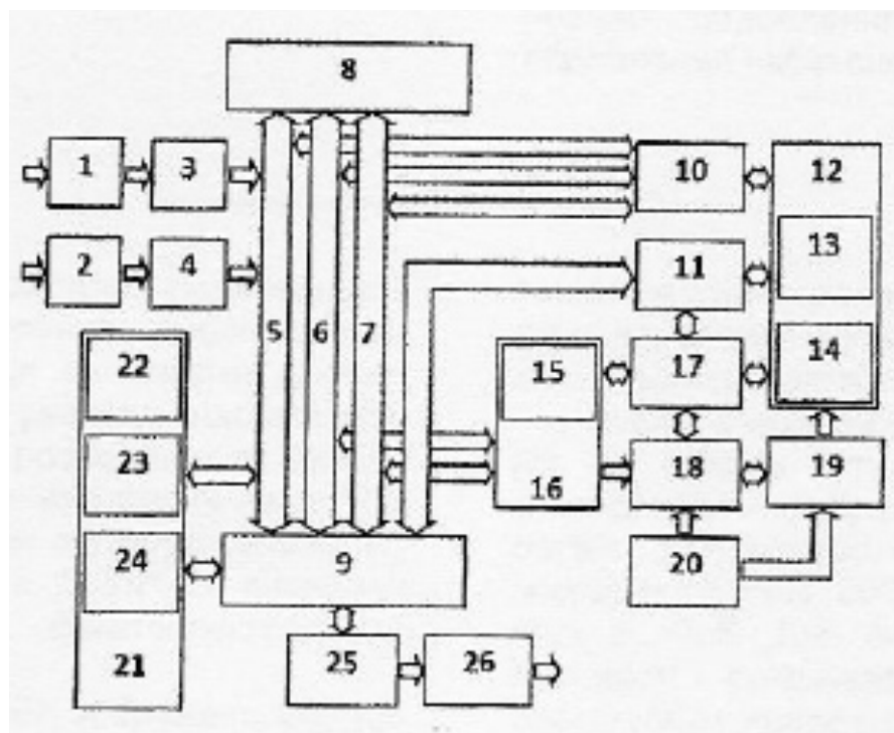


Рис. 5.3. Пристрій підвищення просторового розділення багатоспектральних аерокосмічних зображень [188]: 1, 2 – порти; 3, 4 – буфери; 5 – шина даних; 6 – шина адресу; 7 – шина команд; 8 – програмована пам'ять команд; 9 – оперативна пам'ять; 10 – інтерфейс шини; 11 – інтерфейс пам'яті; 12 – центральний процесор; 13 – арифметико-логічний пристрій; 14 – математичний співпроцесор; 15 – буфер черги команд; 16 – блок впорядкування інструкцій; 17 – контролер переривань; 18 – процесор подій; 19 – таймер; 20 – тактовий генератор; 21 – аналізатор; 22 – постійний запам'ятовуючий пристрій аналізатора; 23 – оперативна пам'ять аналізатора; 24 – суматор аналізатора; 25 – буфер; 26 – порт.

За одержаними результатами класифікації виконується корегування радіометричних значень сигналів для кожного елемента розділення кожного спектрального діапазону ресемпльованого відкаліброваного багатоспектрального аерокосмічного зображення низького розділення за умови збереження середнього радіометричного значення сигналу у відповідному елементі розділення нересемпльованого відкаліброваного багатоспектрального аерокосмічного зображення низького розділення [189].

5.2 Оптичні схеми гіперспектрометрів

Застосування в спектральному приладі в якості фотоприймальних пристроїв ПЗЗ-матриць дозволяє використовувати кожний рядок пікселів, як вузьку вихідну щілину, з розташованими за нею фотоприймачами. Крім того, наявність у кожному рядку великої кількості пікселів дозволяє реєструвати спектральне розкладання випромінювання, що потрапило на різні ділянки вхідної щілини. Таким чином, такий спектрометр дозволяє проводити просторово-спектральний аналіз випромінювання на вхідній щілині, а просторово-спектральний аналіз усього об'єкта може бути здійснений скануванням зображення вхідної щілини по об'єкту. На такому принципі працюють більшість сучасних авіаційних і космічних гіперспектрометрів (із числом виділених спектральних ліній більше 100) для дистанційного зондування Землі.

Оптичні схеми сучасних гіперспектрометрів поєднують в собі оптику, що формує зображення та поліхроматор [190]. Диспергуючі елементи поліхроматорів гіперспектрометрів у вигляді призм або дифракційних ґраток здійснюють просторовий поділ монохроматичних складових випромінювання широкого спектра.

У такому приладі вхідний об'єктив формує вузьку смугу об'єкта на вхідній щілині. Вхідна щілина перебуває у фокусі коліматорного об'єктива спектрометра, який направляє колімоване випромінювання на диспергуючий елемент. Диспергуючий елемент у вигляді дифракційних ґраток, що працюють на пропускання, проводить просторовий розподіл спектрального випромінювання поперек вхідної щілини, а фокусуючий об'єктив буде спектрально розділене зображення вхідної щілини на ПЗЗ-матриці. Застосування в спектральному приладі в якості фотоприймальних пристроїв матриць ПЗЗ дозволяє використовувати кожний рядок фотодетекторів як вузьку вихідну щілину.

Усі існуючі гіперспектрометри можна розділити за принципом дії на три групи [191]:

- 1) гіперспектрометри з диспергуючим елементом;

- 2) гіперспектрометри зі змінним інтерференційним фільтром;
- 3) Фур'є-спектрометри.

У свою чергу, гіперспектрометри з диспергуючим елементом можна розділити на системи із призмовою диспергуючою системою і з диспергуючою системою на основі дифракційних ґраток.

У такому приладі вхідний об'єкт 1 формує вузьку смугу зображення на вхідній щілині 2. Вхідна щілина знаходиться у фокусі коліматорного об'єктива 3 спектрометра, який направляє колімоване випромінювання на диспергуючий елемент 4 або 7. Диспергуючий елемент проводить просторовий розподіл спектрального випромінювання поперек вхідної щілини, а фокусуючий об'єktiv 5 будує спектрально розділене зображення вхідної щілини на ПЗЗ-матриці 6 (рис. 5.4. а). У якості диспергуючого елемента може застосовуватися призма 4, а також дифракційні ґрати 7.

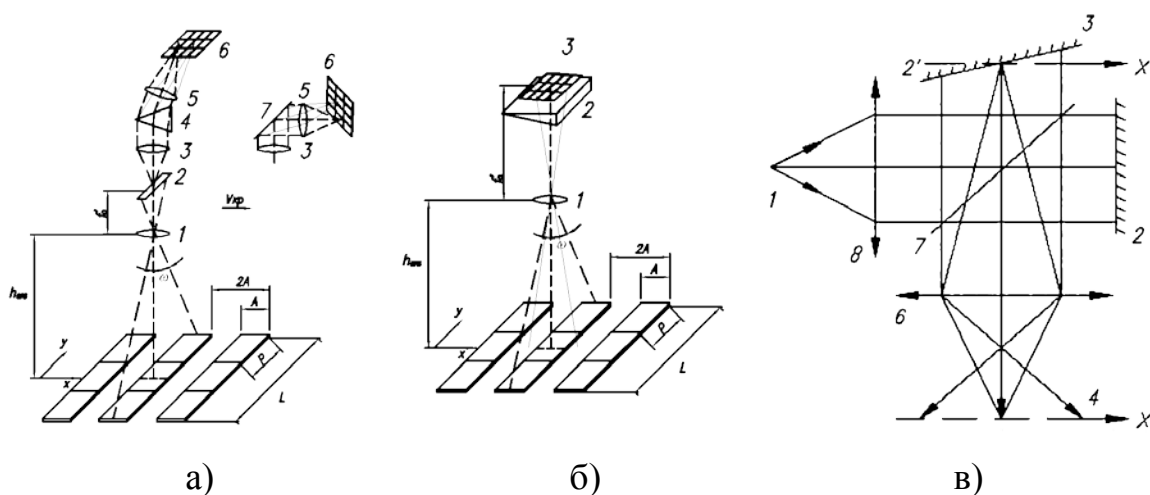
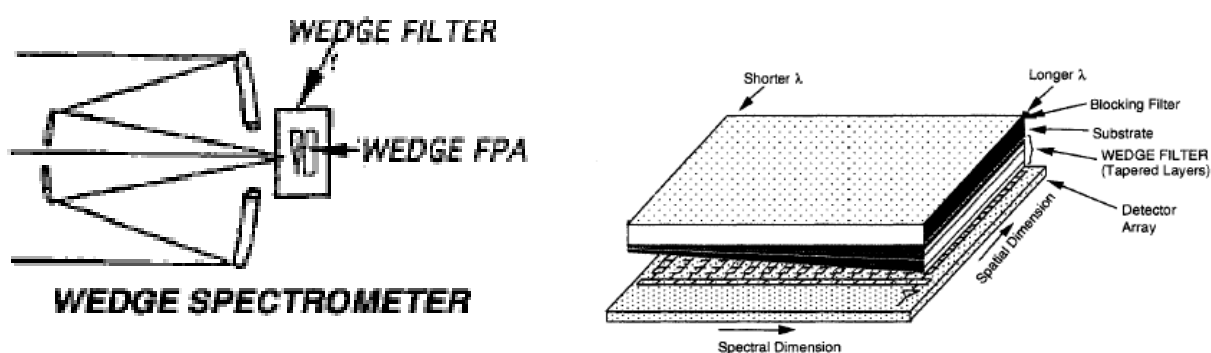


Рис. 5.4. Оптичні схеми гіперспектрометрів

У якості диспергуючого елемента може застосовуватися і призма або система призм, що працює як у прямому, так і у зворотному ході. При цьому для виправлення аберацій застосовують спеціальний асферичний коректор. Подвійне проходження через призму дозволяє збільшити розділення спектрального випромінювання.

Один з найпростіших, але один із самих технологічно важких є спосіб просторово-спектрального розподілу за допомогою «клинового» фільтра. Сутність методу полягає в розміщенні перед матрицею змінного інтерференційного фільтра, що формує на кожному рядку матриці свою вузьку смугу спектрального випромінювання. Для такого способу не потрібна спеціальна оптика спектрометра, а тільки вхідний об'єктив, який буде на матриці зображення не смуги, а великої ділянки Землі. Перед ПЗЗ-матрицею розташовано «клиновий» фільтр, який для кожного рядка матриці формує свій вузький спектральний



діапазон. (рис. 5.5).

Рис. 5.5. Оптична схема гіперспектрометра з «клиновим» фільтром [190]

Одним з істотних недоліків спектральних приладів є кривизна спектральних ліній, що виникає через те, що пучки променів із точок щілини, що не лежать у меридіональній площині, проходять через диспергуючий елемент (призму або дифракційну ґратку) поза його головним перетином, утворюючи з ним невеликі кути. Тому пряма вхідна щілина зображується у вигляді дуги, опуклість якої звернена у бік довгохвильової частини спектра.

Для виправлення кривизни спектральних ліній можна застосувати систему із призмами, поверхні яких виконані не плоскими, а сферичними [192] (рис. 5.6). Але виготовлення таких елементів, а також юстування такої схеми являє собою дуже важке завдання.

Заслуговує уваги ще один тип гіперспектрометра – Фур'є спектрометр. Головна відмінність Фур'є-спектрометра від відеоспектрометра з поліхроматором полягає в тому, що на приймачі зображення по спектральній

координаті утворюється не спектр пікселя, а інтерферограма робочого спектрального діапазону. Шуканий спектр отримується після виконання зворотного фур'є-перетворення інтерферограми засобами сучасної обчислювальної техніки. Звідси й відбулося найменування приладу. Оптичні системи Фур'є-спектрометрів мають у своєму складі інтерферометр. Для роботи у видимій області спектра доцільне застосування статичних Фур'є-спектрометрів без застосування рухливих елементів.

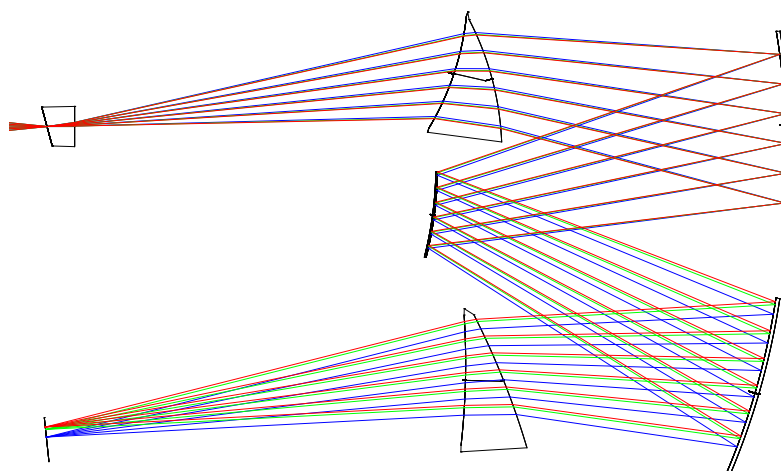


Рис. 5.6. Оптична схема спектрометра з сферичними поверхнями призм

Більшість Фур'є-спектрометрів будується на основі інтерферометра Майкельсона, що формує смуги рівної товщини [193]. Вхідний об'єктив проектує зображення об'єкта на щілині 1. Потім одновимірне зображення за допомогою об'єктива коліматора 8 пропускається через інтерферометр 7, 2, 3, де промені розщеплюються (по амплітуді), небагато зміщаються (з'являється різниця ходу) і, возз'єднуючись, створюють одновимірну інтерферограму (по другій осі прямокутної системи координат) (рис. 5.7). Фур'є оптика 6 проектує інтерферограму на ПЗЗ-матрицю 4, а циліндрична оптика формує зображення щілини 1 об'єкта на ПЗЗ-матриці 4.

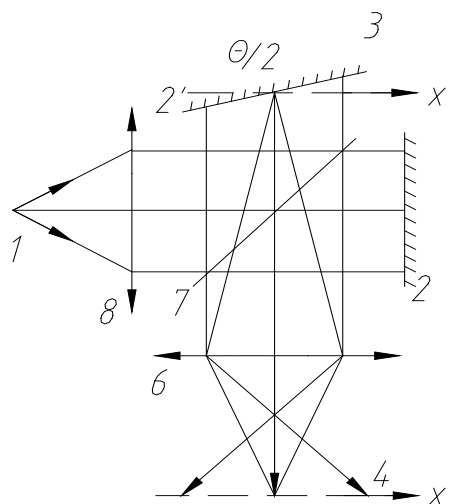


Рис. 5.7. Оптична схема Фур'є-спектрометра

5.2.1 Оптична схема гіперспектрометра на дифракційній ґратці

Внаслідок того, що гіперспектрометри мають вузькі спектральні канали, то для отримання достатнього рівня сигналу вони не можуть мати високе просторове розділення. З іншого боку просторове розділення обмежується швидкодією приймача випромінювання. Так як гіперспектрометри працюють спільно з матричними приймачами випромінювання частота кадрів яких не така висока, як в ПЗЗ-лінійках, а час прольоту КА шляху, що відповідає величині проекції одного пікселя, не повинен перевищувати часу формування одного кадру, то максимально можливе просторове розділення визначається як:

$$GSD = V_{nm} t_f = \frac{V_{nm}}{f_f}. \quad (5.4)$$

При швидкості підсупутникової точки $V_{nm} = 6811$ м/с для отримання величини проекції пікселя $GSD = 46,5$ м потрібна матриця з частотою кадрів $f_f \geq 150$ Гц. При цьому, для узгодження смуги захвату гіперспектрометра з смугою захвату багатоспектрального сканера з метою подальшої сумісної обробки зображень для підвищення просторового розділення потрібна матриця формату не менш ніж 1000×1000 пікселів. Вибір матриць з такими параметрами є дуже обмежений.

Для забезпечення необхідного просторового розрізнення оптична система гіперспектрометра повинна мати фокусну відстань

$$f'_o = \frac{h_f \cdot p}{GSD}, \quad (5.5)$$

де p – розмір пікселя матричного приймача випромінювання.

Світлосила оптичної системи повинна бути як можливо більшою для отримання достатнього радіометричного розділення. При величині проєкції пікселя $GSD = 46,5$ м та спектральній ширині каналу $\delta\lambda \approx 4$ нм світлосила оптичної системи повинна бути приблизно $F/3,5$.

Оптична схема гіперспектрометра складається з вхідного об'єктиву, який створює зображення підстильної поверхні Землі. В фокальній площині вхідного об'єктиву розташовано щілину, яка вирізає з усього поля зображення вузьку смугу. Ширина щілини визначає просторове розділення гіперспектрометра вздовж напрямку польоту КА. За щілиною розташовано спектрометр, який складається з проєкційного об'єктиву, що створює зображення щілини в площині МПВ та дифракційної ґранки, яка розкладає випромінювання по ширині щілини вздовж спектральної координати МПВ.

Для зменшення впливу хроматизму в спектральних приладах часто використовують дзеркальні об'єктиви, тому вхідний і проєкційний об'єктив бажано будувати на дзеркальних елементах.

Вхідний об'єктив доцільно будувати по схемі тридзеркального об'єктиву з позаосьовим полем зору, що описаний в розділі 3.1. Середню відстані між дзеркалами виберемо в діапазоні $0,42 < d_{cp} < 0,43$, щоб значно полегшати виготовлення і контроль такого об'єктива. Такий об'єктив має якість зображення близьку до дифракційної по всьому полю зору.

Найбільш часто в сучасних спектрометрах для побудови проєкційного об'єктива з дифракційною ґраткою застосовують схему Оффнера з застосуванням двох дзеркал з трикратним відбиванням або з застосуванням трьох дзеркал. Така схема дозволяє виправити аберації 3-го порядку при роботі з великою апертурою [194]. При цьому дифракційна ґратка

наноситься на вторинне опукле сферичне дзеркало. Лінійне збільшення об'єктива з застосування двох дзеркал, зазвичай, дорівнює $\beta = -1^{\times}$.

Для виправлення кривизни поля зору дзеркального об'єктива перед фокальною площиною додатково введено додатній меніск. Схема такого проєкційного об'єктива представлена на рис. 5.8. Такий об'єктив забезпечує рівномірне спектральне розділення в усьому робочому спектральному діапазоні (рис. 5.9) та МПФ близьку до дифракційної межі (рис. 5.10). Крім того, дисторсійні спотворення в об'єктиві не перевищують 2 мкм (рис. 5.11).

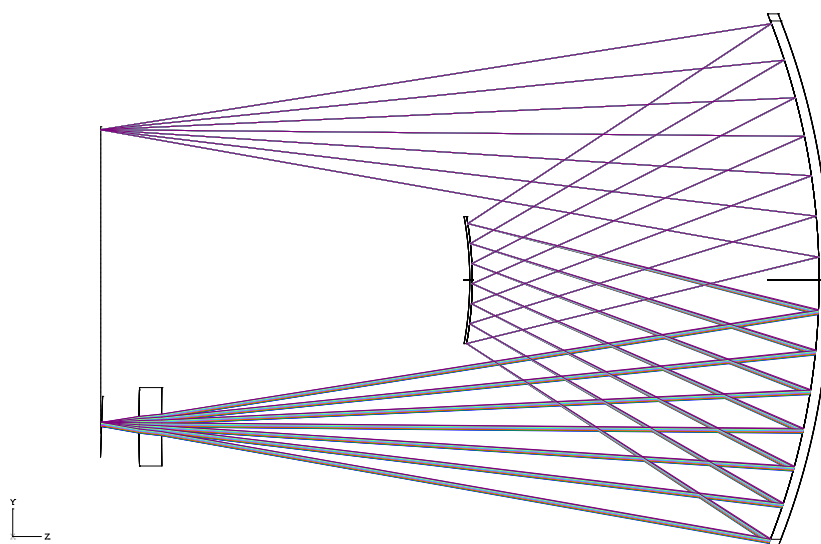


Рис. 5.8. Оптична схема об'єктива спектрометра з дифракційною ґраткою та лінзовим польовим коректором

Хоча об'єктив Оффнера з дифракційною ґраткою має високу якість зображення, але великим недоліком систем з дифракційними ґратками є їх низька дифракційна ефективність, яка складає близько 35% для звичайних ґраток та може бути підвищена до 70% при застосуванні складного профілю для рисок ґратки. Крім того, на ґратці утворюється додаткове світлорозсіювання.

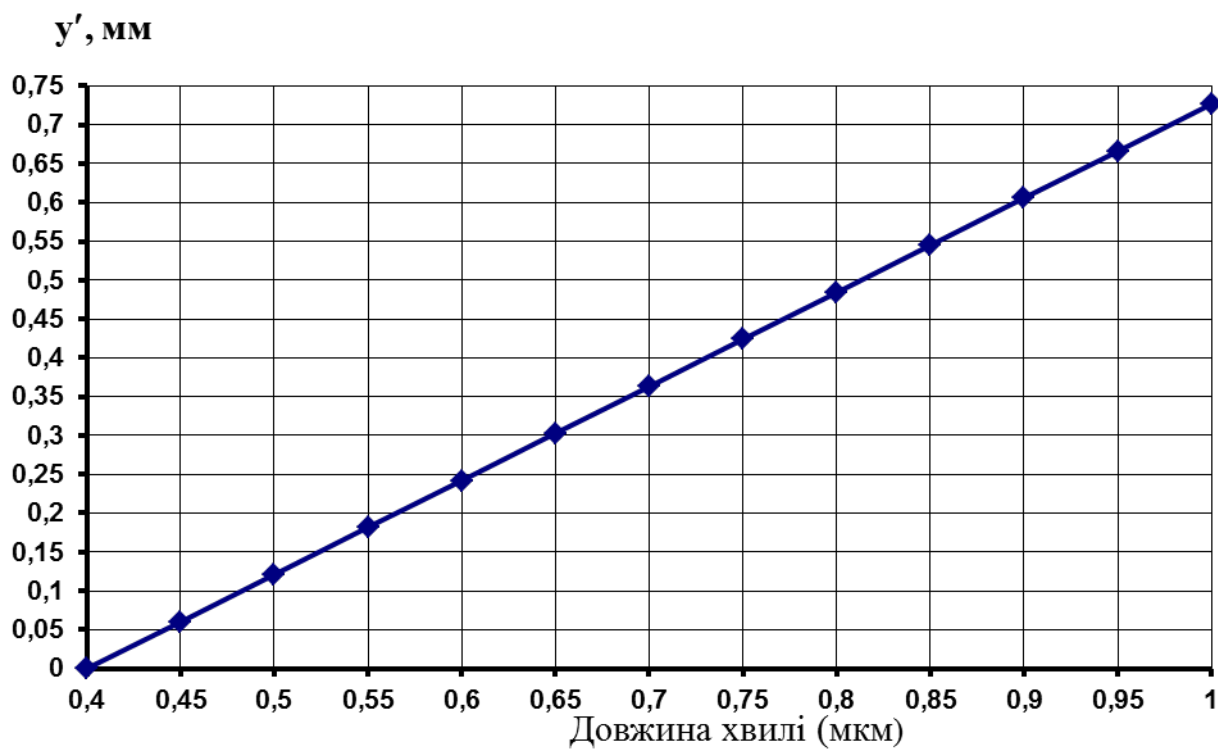


Рис. 5.9. Спектральна залежність спектрометра Оффнера з
дифракційною ґраткою

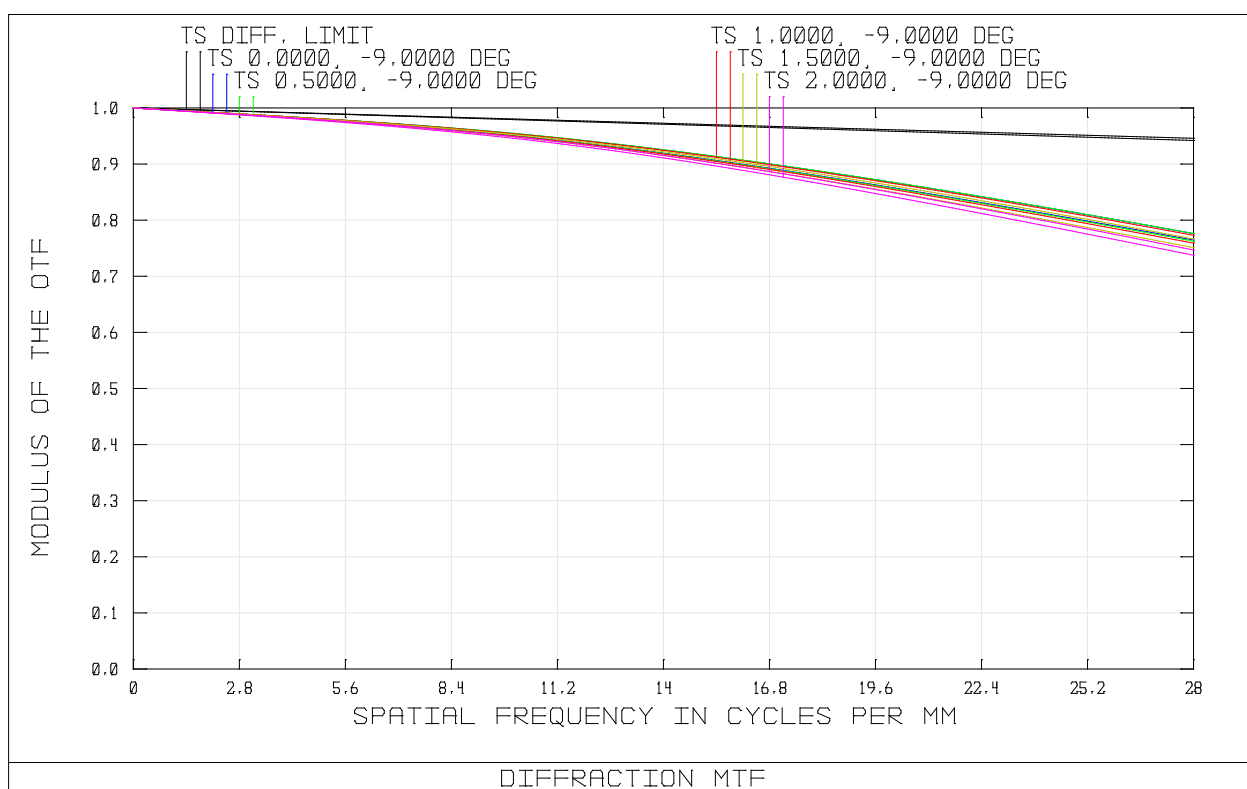


Рис. 5.10. МПФ об'єктива спектрометра для $\lambda = 0,7$ мкм

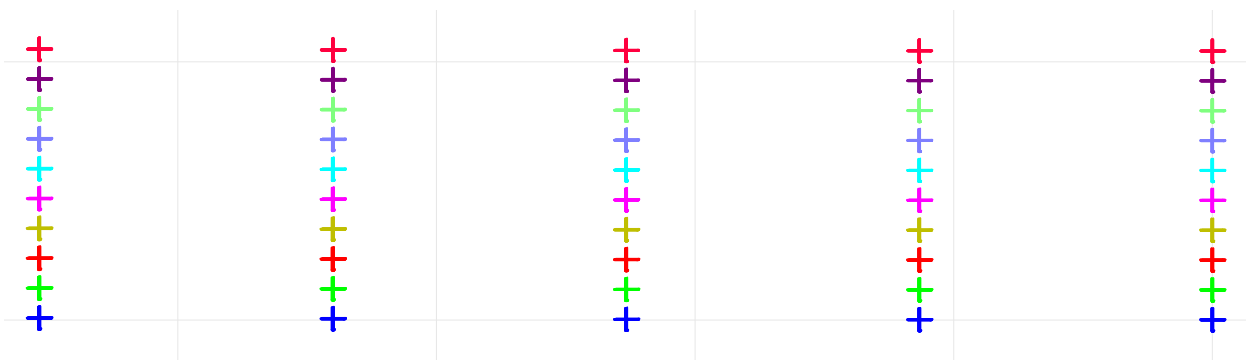


Рис. 5.11. Розклад зображення по просторовій та спектральній координатах в площині матричного приймача випромінювання

Розрахована оптична схема гіперспектрометра зображена на рис. 5.12 та складається з гіперболічного увігнутого головного 1, параболічного опуклого вторинного 2 та сферичного увігнутого третинного 3 дзеркал вхідного об'єктива, який будує зображення в площині вхідної щілини 4 спектрометра. Після проходження щілини випромінювання падає на увігнуте сферичне дзеркало 5 спектрометра, відбивається від нього та потрапляє на дифракційну ґранку, що виготовлена на сферичному дзеркалі 6. Дисперговане випромінювання знову потрапляє на дзеркало 5, відбивається від нього, проходить лінзовий польовий коректор 7 та потрапляє на матричний приймач випромінювання 8.

Розрахована оптична система гіперспектрометра має такі характеристики [195]:

- Просторове розділення $GSD = 46,5$ м;
- Смуга захвату 47,6 км;
- Фокусна відстань $f' = 257,7$ мм;
- Відносний отвір 1:3,14;
- Кутове поле зору $\sigma_x = \pm 2,05^\circ$;
- Робочий спектральний діапазон $\Delta\lambda = 0,45 \div 0,9$ мкм;
- Кількість спектральних каналів – 115;
- Спектральне розділення $\delta\lambda \approx 3,9$ нм;
- ПЗЗ матриця CCD180-1M-SFT (1024×1024 ; 18×18 мкм²);

- Просторова частота дифракційної ґратки 15 мм^{-1} .

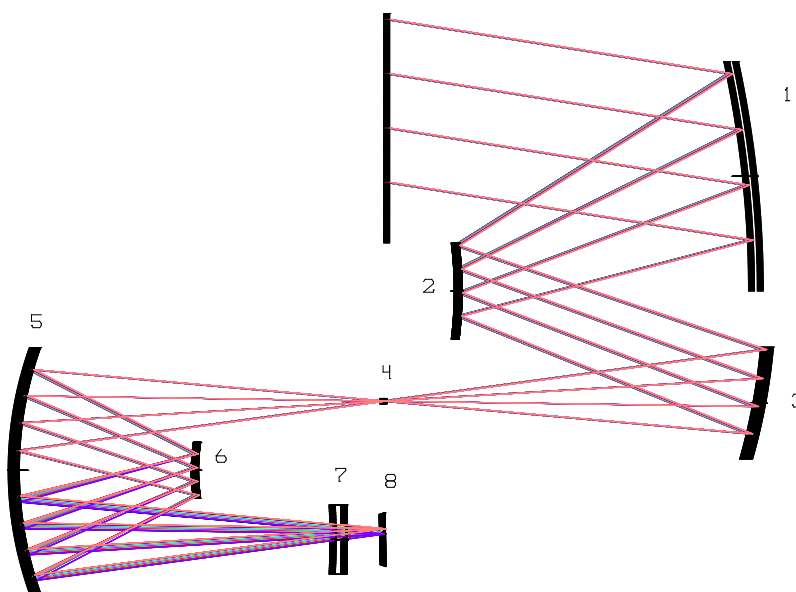


Рис. 5.12. Оптична схема гіперспектрометра з дифракційною ґраткою

До переваг гіперспектрометра з дифракційною ґраткою можна віднести дуже малі дисторсійні спотворення по усьому полі зору, високе спектральне розділення рівномірне по робочому спектральному діапазону та великий відносний отвір об'єктива 1:3,14, що забезпечує достатній рівень відношення сигнал/шум.

5.2.2 Оптична схема гіперспектрометра на призмі

На рис. 5.13 представлено оптичну схему гіперспектрометра з диспергуючою системою на призмі. Як і в випадку із системою з дифракційною ґраткою вхідний об'єктив побудовано по схемі тридзеркального об'єктива з позаосьовим полем зору, в якому головне дзеркало 1 гіперболічне, а вторинне 2 та третинне 3 дзеркала мають сферичну форму поверхні.

Для розрахунку об'єктива спектрометра було обрано автоколімаційну дводзеркальну схему з призмою 6, яка знаходиться перед вторинним дзеркалом 7. З метою поширення можливості роботи спектрометра в середньому інфрачервоному діапазоні матеріалом для призми обрано кварц. Кути призми вибирались таким чином, щоб забезпечити в фокальній площині

об'єктива спектрометра відстань між кружками розсіювання для $\lambda = 0,4$ мкм та $\lambda = 1,0$ мкм не менш ніж $\Delta y' \geq 1,2$ мм, що дало змогу отримати 100 спектральних каналів. Для забезпечення високої просторової та спектральної роздільної здатності автоколімаційне дзеркало 7 є сферичним та децентрованим відносно оптичної осі, а матричні приймачі випромінювання нахилені відносно площини зображення на кут від 4° до 7° [196].

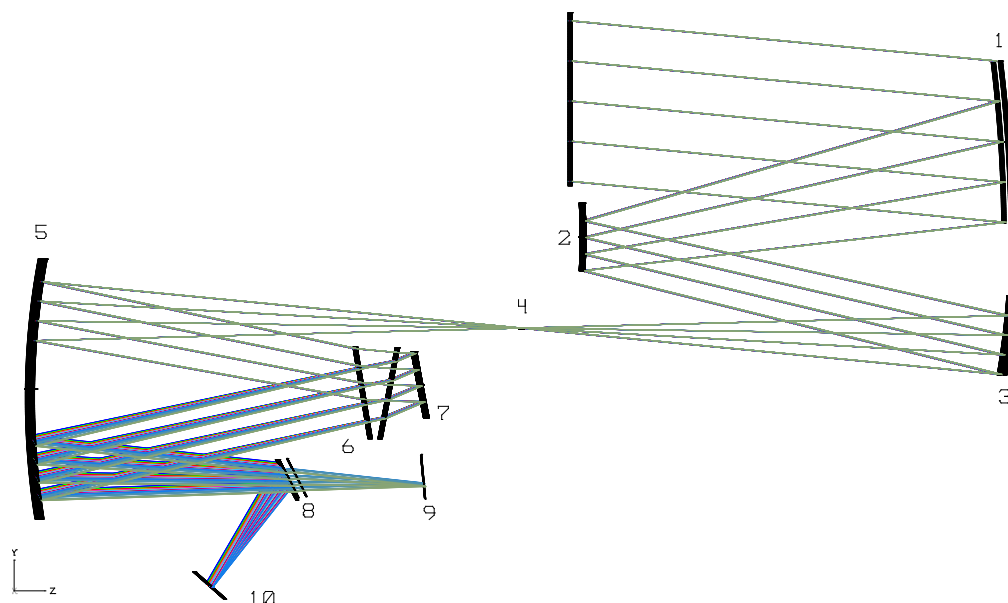


Рис. 5.13. Оптична схема гіперспектрометра з призмовим диспергувальним елементом з кварцу

Після двократного проходження через призму 6 сферичне дзеркало 5 будує зображення на матриці 10 видимого діапазону та на матриці 9 середнього ІЧ діапазону. Спектральне розділення між каналами відбувається за допомогою спектродільника 8.

Відстань між кружками розсіювання для $\lambda = 0,4$ мкм та $\lambda = 1,0$ мкм більш ніж $\Delta y' \geq 1,5$ мм, що при розмірі пікселя 0,012 мм дасть змогу отримати 104 спектральних каналів (рис. 5.14). Півширина спектральних каналів в залежності від довжини хвилі представлена на рис. 5.15. В діапазоні довжин хвиль $\Delta\lambda = 1,5 \div 1,7$ мкм при розмірі пікселя 0,03 мм отримаємо 5 каналів з півшириною спектральних каналів 40 нм, а в діапазоні довжин

хвиль $\Delta\lambda = 2,2 \div 2,4$ мкм отримаємо 7 каналів з півшириною
 спектральних каналів 28 нм.

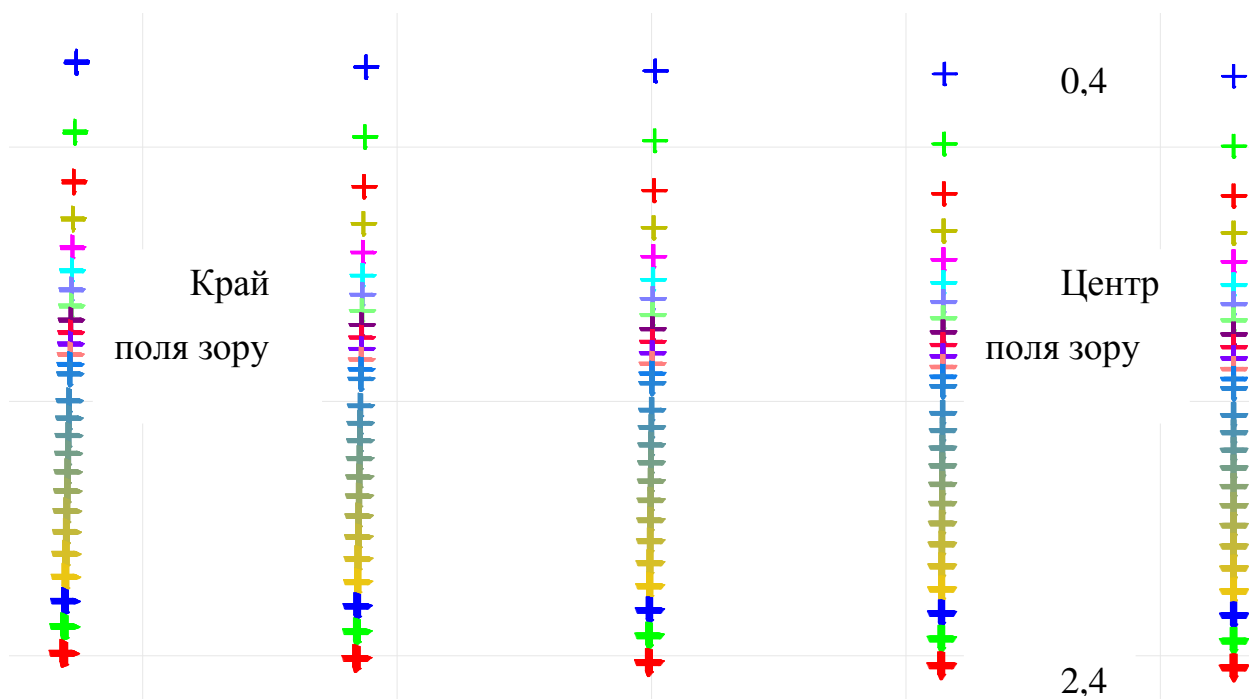


Рис. 5.14. Розташування кружків розсіювання в залежності від довжини хвилі в фокальній площині гіперспектрометра

До переваг гіперспектрометра з призмою можна віднести простоту конструкції (тільки одне асферичне дзеркало), суміщення в одному приладі двох спектральних діапазонів, висока якість зображення.

До недоліків потрібно віднести значні дисторсійні спотворення по полю зору в залежності від довжини хвилі (рис. 5.14), залежність спектрального розділення від довжини хвилі і неможливість отримати світлосилу, кращу ніж 1:4,5, що не забезпечує високих значень відношення сигнал/шум. Гіперспектрометр використовує МПВ з розміром пікселя 12 мкм і має 104 спектральних каналів.

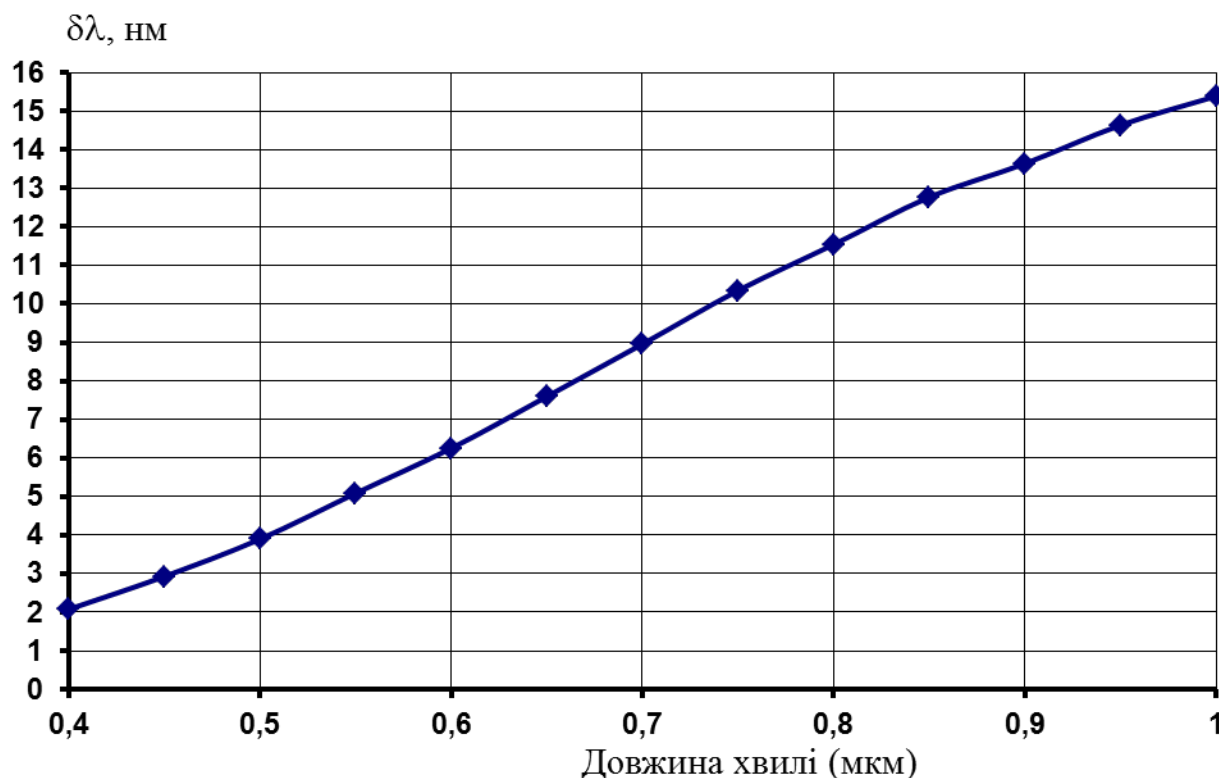


Рис. 5.15. Спектральне розділення гіперспектрометра, який використовує призму із кварцу

5.2.3 Зображувальні Фур'є спектрометри

Просторово-спектральний розподіл енергії на поверхні, за якою ведеться спостереження, може бути отримано й при використанні Фур'є-спектрометра (ФС). ФС мають кращі можливості для отримання значного спектрального розділення [197].

Зображувальний Фур'є-спектрометр (ЗФС) відноситься до спектральних скануючих систем пасивного типу. Крім зображення підстильної поверхні Землі він реєструє інтерференційну картину кожного пікселя. Відновлення спектру об'єкту здійснюється шляхом зворотного перетворення Фур'є сигналу, що зареєстрував МПВ [198].

В залежності від способу отримання різниці ходу між променями ЗФС діляться на: 1) статичні Фур'є-спектрометри (СФС), у яких інтерферограма нерухома, а формування просторової координати створюється скануванням поверхні Землі при русі КА; 2) динамічні Фур'є-спектрометри (ДФС), в яких

різниця ходу променів створюється шляхом переміщення одного з дзеркал інтерферометра [199].

Якщо в ДФС вимірюють різницю оптичної довжини шляху світлової хвилі в часі, то в СФС різниця оптичної довжини шляху вимірюється в просторі (введенням клину в інтерферометрі Майкельсона або додаткового зсуву в інтерферометрі). Відсутність рухомих частин дозволяє швидко реєструвати інтерферографу на ПЗЗ-матриці [200].

Статичний Фур'є-спектрометр має ряд переваг над динамічним Фур'є-спектрометром:

- СФС має один робочий канал на відміну від ДСФ, який має робочий канал, референтний лазерний канал та канал білого світла;
- Швидкодія СФС визначається сталою часу приймача випромінювання, а в ДФС часом сканування зміни різниці оптичної довжини шляху;
- Стабільність інтерференційної картини.

Статичні Фур'є-спектрометри, як правило, використовують один з трьох типів інтерферометрів [193]:

- Інтерферометр з поперечним зміщенням інтерферуючих променів;
- Інтерферометр, який формує смуги рівної товщини (інтерференція в клині);
- Поляризаційні інтерферометри.

Принцип роботи інтерферометра з поперечним зміщенням показано на рис. 5.16. [201]. Інтерферограма являє собою функцію різниці ходу променів Δ , що лінійно змінюється разом з координатою y в просторі

$$\Delta = \frac{T \cdot y}{f'_o}. \quad (5.6)$$

Розподіл освітленості у полі двопрменевої інтерференції монохроматичних фронтів описується, як

$$E = E_0 \left(1 + \cos 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} \right) = E_0 \left(1 + \cos 2\pi \frac{T y}{f'_o \lambda} \right), \quad (5.7)$$

де E_O – освітленість, що створюється кожним з фронтів, f'_o – фокусна відстань вихідного об'єктива. При цьому ширина смуг буде визначатися виразом

$$p = \frac{\lambda f'_o}{T}. \quad (5.8)$$

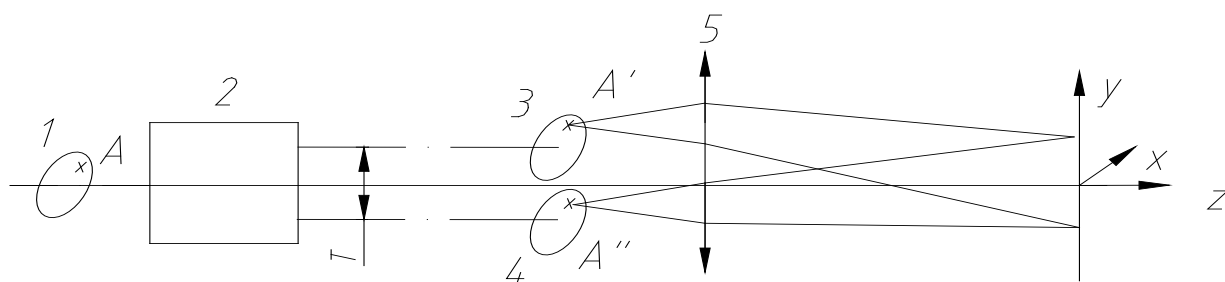


Рис. 5.16. Принцип роботи інтерферометра з поперечним зміщенням:

1 – джерело випромінювання; 2 – інтерферометр, який вносить поперечне зміщення променів на величину T ; 3, 4 – зображення джерела випромінювання; 5 – вихідний об'єktiv

СФС, що побудовано на базі інтерферометра Сан'яка [190,201,202], представлено на рис. 5.17.

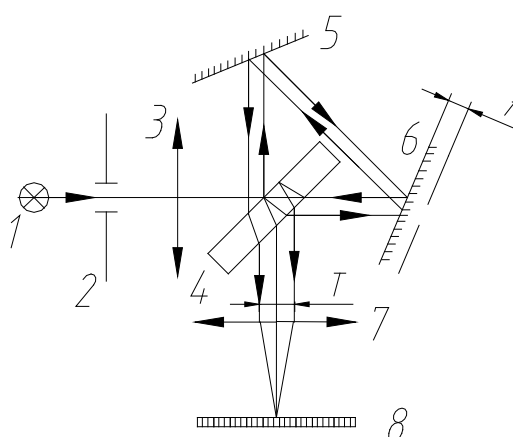


Рис. 5.17. Інтерферометр Сан'яка: 1 – джерело випромінювання; 2 – вхідна щілина; 3 – вхідний об'єktiv-коліматор; 4 – світлоподільник; 5, 6 – дзеркала; 7 – вихідний об'єktiv; 8 – фотоприймач випромінювання

Поперечне зміщення пучків досягається за рахунок зміщення одного з дзеркал інтерферометра в напрямку його нормалі на величину t . При цьому величина зміщення пучків променів буде [201]

$$T = \sqrt{2}t. \quad (5.9)$$

Вхідний об'єктив формує зображення вхідної діафрагми в площині вхідної зіниці приладу, яка співпадає з передньою фокальною площиною вихідного об'єктиву. Вихідний об'єктив будує це зображення в нескінченності, а інтерференційна картина локалізується в задній фокальній площині вихідного об'єктиву.

Загальне число інтерференційних смуг випромінювання з довжиною хвилі λ в фокальній площині вихідного об'єктиву з лінійним полем зору L буде [201]

$$N = \frac{L}{\lambda} \frac{T}{f'_o} = \frac{L}{P}, \quad (5.10)$$

а максимальне значення різності ходу на краю інтерференційного полю при різності ходу в центрі поля $\Delta=0$

$$\Delta_{\max} = \frac{N}{2} \lambda = \frac{L}{2} \frac{T}{F}. \quad (5.11)$$

При цьому межа розділення, що виражена в хвильових числах, визначається за формулою

$$\delta\sigma = \frac{1}{2\Delta} = \frac{f'_o}{LT}, \quad (5.12)$$

а величина роздільної здатності – за формулою

$$R_0 = \frac{\sigma}{\delta\sigma} = \frac{\sigma LT}{f'_o} = \frac{LT}{f'_o \lambda} = \frac{L}{P} = N. \quad (5.13)$$

Найбільш популярними є СФС на основі інтерферометра Майкельсона, які формують смуги рівної товщини завдяки інтерферометру, що побудований на призмі-кубі з двох призм з кутами заломлення 45° та $45^\circ+1\dots2^\circ$ [203]. Схему такого інтерферометра Майкельсона зображено на рис. 5.18.

Рівняння розподілу освітленості монохромного випромінювання уздовж координати X описується гармонічною функцією

$$E = E_0 \left[1 + \cos 2\pi \frac{\Delta(X)}{\lambda} \right], \quad (5.14)$$

де $\Delta(X) = |\theta \cdot X|$ при $\frac{L}{2} \leq X \leq \frac{L}{2}$, L – розмір дзеркала.

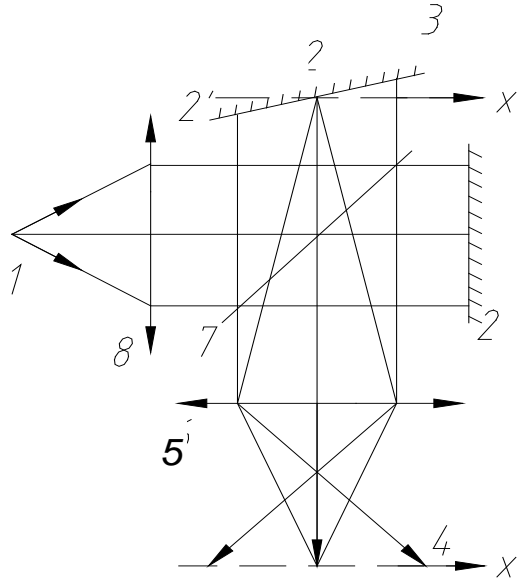


Рис. 5.18. Інтерферометр Майкельсона: 1 – джерело випромінювання (щілина в фокальній площині вхідного об’єктива); 2 – площина дзеркала; 2' – зображення дзеркала 2; 3 – нахилене дзеркало; 4 – матричний фотоприймач випромінювання; 5, 6 вихідний Фур’є-об’єктив; 7 – світлоподільник; 8 – вхідний об’єктив інтерферометра

Якщо на фотоприймач падає світло, яке має спектральний розподіл $Q(\lambda)$, то сигнал фотоприймача буде відповідати інтегралу сигналів, які викликані всіма монохроматичними складовими спектру

$$I(\Delta) = \int_{\lambda_{MIN}}^{\lambda_{MAX}} E_0(\lambda) Q(\lambda) \left[1 + \cos 2\pi \frac{\Delta(X)}{\lambda} \right] d\lambda. \quad (5.15)$$

Для формування зображення в Фур’є-спектрометрі статичного типу необхідно визначити параметри вхідної оптики, що формує зображення підстильної поверхні Землі в своїй фокальній площині, де розташовано вхідну щілину СФС. Параметри вхідної оптики визначають по математичній моделі, яка аналогічна математичній моделі вхідного об’єктиву гіперспектрометра і дозволяє визначити [204]:

- фокусну відстань;
- поле зору приладу (виходячи з розміру приймача випромінювання);
- розмір проекції пікселя на поверхні Землі (виходячи з висоти орбіти космічного апарата, параметрів приймача випромінювання);
- ширину смуги захвату (виходячи з поля зору та висоти орбіти).

Як вхідні дані модель використовує висоту орбіти космічного апарата та параметри приймача випромінювання.

Числові дані, які отримані з використанням цієї математичної моделі можуть бути використані як вхідні дані для другої математичної моделі.

Друга модель дозволяє описати формування інтерференційної картини [205]. Вона враховує такі параметри, як розподіл яскравості на земній поверхні та кутовий нахил установки одного з дзеркал інтерферометра (рис. 5.18). Така модель дозволяє розрахувати інтерференційну картину на приймачі випромінювання, а також через розрахунок різниці ходу променів на приймачі визначити спектральний діапазон та спектральне розділення приладу в залежності від розміру приймача. За допомогою такої моделі можна також вирішити обернену задачу: визначити нахил дзеркала θ виходячи з потрібної оптичної різниці ходу променів на приймачі випромінювання.

На рис. 5.19 зображено розподіл освітленості на матричному приймачу випромінювання формату 624×624 з розміром пікселя $0,032 \times 0,032$ мм, який було розраховано за формулою (5.14) для сусідніх інтервалів спектру $\Delta\lambda_1 = 0,4 \div 0,45$ мкм і $\Delta\lambda_2 = 0,41 \div 0,46$ мкм при розмірі дзеркала інтерферометра $L = 20$ мм та куту нахилу дзеркала $3\theta = 12'$.

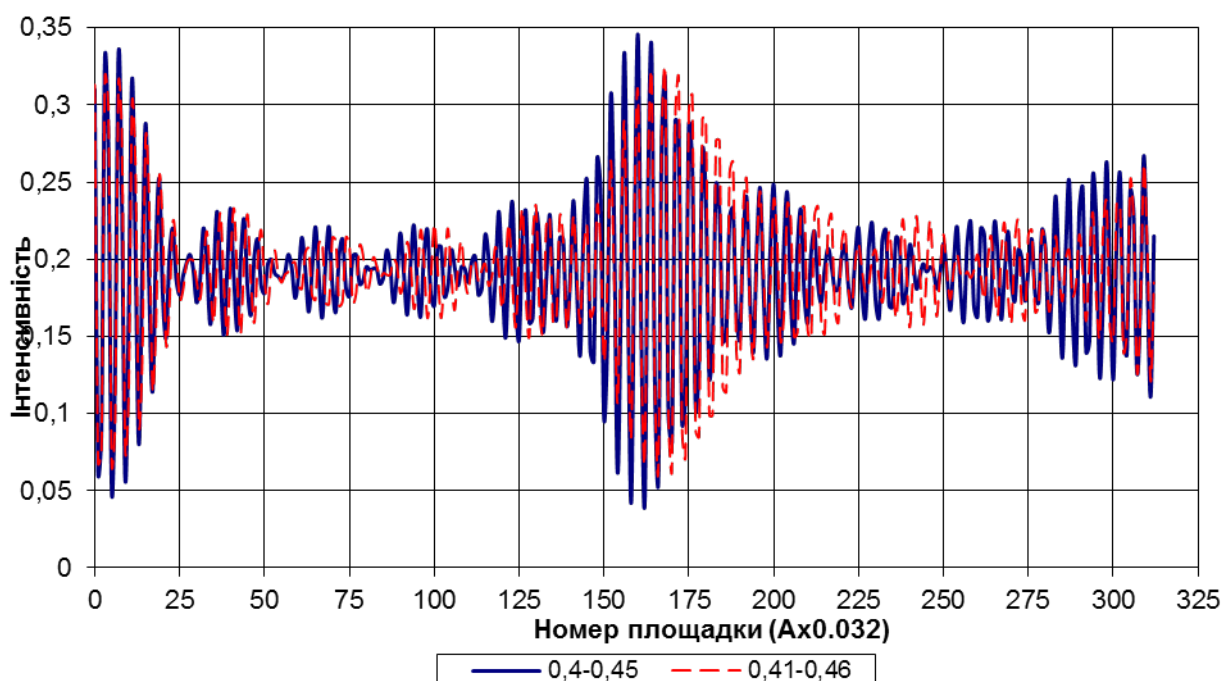


Рис. 5.19. Приклад розподілу інтенсивності на інтерферограмі в площині ПЗЗ-матриці для $\Delta\lambda_1=0,4\div0,45$ мкм та $\Delta\lambda_2=0,41\div0,46$ мкм

Оптична схема ЗФС складається з вхідного об'єктива, який буде зображення підстильної поверхні Землі в площині, де розташовано вхідну щілину інтерферометра 1 (рис. 5.15). Щілина розташована в фокальній площині вхідного об'єктиву інтерферометра 8, тому після нього отримаємо паралельний пучок променів, який попадає на кубик інтерферометра 2, 3, 7. Інтерференційний блок розділяє пучок світла на подільній грані 7 на два пучка. За рахунок розвороту дзеркальної грані 3 на кут $\theta = 12'$ навколо осі, що перпендикулярна меридіональній площині перетину, між двома пучками виникає різниця ходу, що обумовлена клиноподібністю кубика. Інтерференційна картина у вигляді смуг рівної товщини локалізується поблизу дзеркала 3.

Після інтерферометричного блоку розташовано вихідний Фур'є-об'єктив 5, 6, який має циліндричну лінзу. Об'єктив з циліндричною лінзою має дві різні фокусні відстані в меридіональній та сагітальній площинах перетину. Уявна площина локалізації інтерференційних смуг знаходиться на

подвійній фокусній відстані від об'єктива 5, 6 та фокусується в меридіональній площині перетину в площину ПЗЗ-матриці зі збільшенням $\beta = -1^{\times}$. У сагітальному перетині площина локалізації інтерференційних смуг розташована у передній фокальній площині об'єктива 5, 6, тому на матрицю після об'єктива падає паралельний пучок світла і в сагітальній площині відсутнє зображення інтерферограми. Натомість фокусна відстань вихідного Фур'є-об'єктива в сагітальному розтині повинна бути такою, щоб побудувати зображення щілини 1 в площині ПЗЗ-матриці 4.

Таким чином, просторове розділення ЗФС в меридіональному перетині визначається шириною вхідної щілини Фур'є-спектрометра та фокусною відстанню вхідного об'єктива ЗФС, а в сагітальному розтині – розміром пікселя ПЗЗ-матриці та еквівалентною фокусною відстанню вхідного об'єктива і вихідного об'єктива Фур'є-спектрометра.

Висновки до розділу 5

Проведені дослідження оптичних систем сучасних гіперспектрометрів показали, що

1. Усі існуючі гіперспектрометри можна розділити за принципом дії на гіперспектрометри з диспергуючими елементами у вигляді дифракційних ґраток і призм, а також Фур'є-спектрометри.
2. До переваг гіперспектрометра з дифракційною ґраткою можна віднести малі дисторсійні спотворення по усьому полі зору, високе спектральне розділення, рівномірне в робочому спектральному діапазоні, та високий відносний отвір об'єктива, що забезпечує достатній рівень відношення сигнал/шум. Значним недоліком систем з дифракційними ґратками є їх низька дифракційна ефективність, яка складає близько 35% для звичайних ґраток та може бути підвищена до 70% при застосуванні складного профілю для штрихів ґратки.
3. До переваг гіперспектрометра з призмовою диспергуючою системою

можна віднести простоту конструкції, суміщення в одному приладі двох спектральних діапазонів, висока якість зображення. До недоліків таких гіперспектрометрів необхідно віднести значні дисторсійні спотворення по полю зору в залежності від довжини хвилі, залежність спектрального розділення від довжини хвилі і неможливість отримати світлосилу, кращу ніж 1:4,5, що не забезпечує великих значень відношення сигнал/шум.

4. Просторове розділення зображаючих Фур'є-спектрометрів в меридіональному перетині визначається шириною вхідної щілини та фокусною відстанню вхідного об'єктива спектрометра, а в сагітальному перетині – розміром пікселя ПЗЗ-матриці та еквівалентною фокусною відстанню вхідного об'єктива і вихідного об'єктива спектрометра.
5. Запропоновано оптичну схему перспективного супутникового гіперспектрометра з покращеними характеристиками: робочий спектральний діапазон – 0,4-2,5 мкм; спектральне розділення – 6-30 нм; кількість спектральних каналів – 150; просторове розділення на місцевості – 45 м; ширина смуги огляду – 46 км.

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМІЧНИХ ОПТИКО- ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

6.1 Геометричне калібрування систем дистанційного зондування

Сучасний рівень розробки і виробництва сканерів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з матричними та лінійними приймачами зображення висуває досить високі вимоги до їхнього калібрування, оскільки це прямо пов'язане з достовірністю одержуваної інформації. У процесі перетворення оптичної інформації оптичною системою сканера виникають неминучі спотворення, обумовлені похибками виготовлення оптичних елементів і їх складання, крім того, присутні спотворення, що обумовлені похибками установки фотоприймачів в фокальній площині об'єктиву.

Калібрування сканера полягає у визначенні зв'язку візирних променів елементів фотоприймальних лінійок у просторі предметів щодо контрольного елемента (КЕ) сканера. Для розв'язання цього завдання достатньо визначити відповідне кутове положення крайніх зон фотоприймальних лінійок, так як геометричні похибки виготовлення фотоприймальних лінійок на порядки менше за інші похибки [206].

На рис. 6.1,а схематично представлено сканер ДЗЗ, що має чотири фотоприймальні лінійки, які розташовані в його фокальній площині в шаховому порядку із зонами перенакладення пікселів ΔL (рис. 6.1,б). Контрольний елемент нерухомо закріплений на корпусі сканера. Візирні осі світлочутливих елементів фотоприймальних лінійок проходять через центр вхідної зіниці об'єктива і центр відповідного пікселя лінійки [207].

Метою калібрування є визначення наступних параметрів:

- 1) значення кутів між нормальми до «нульової» грані КЕ сканера і положеннями візирної осі, відповідними до країв фотоприймальних лінійок сканера γ ;
- 2) кутову відстань між поздовжніми осями фотоприйомних лінійок φ ;

3) кутове відхилення поздовжніх осей фотоприйомних лінійок щодо їхнього номінального розташування ω .

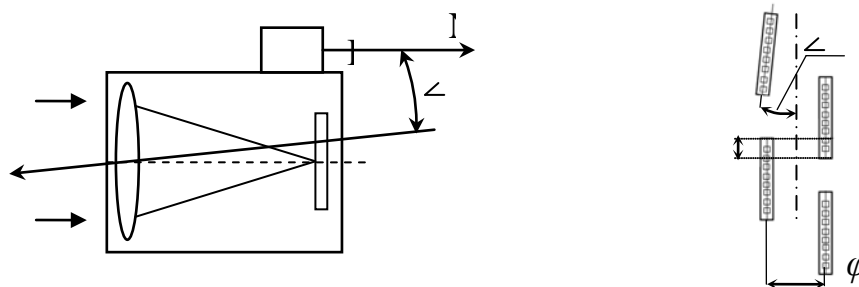


Рис. 6.1. а [207] – схематичне зображення сканера; б – розташування фотоприймальних лінійок у фокальній площині об'єктива сканера, де f' – фокусна відстань об'єктива сканера

Для реалізації даного методу був розроблений колімаційний вимірювальний комплекс, оптична схема якого представлена на рис. 6.2,а. Для формування зображення тест-об'єкта, розташованого на нескінченності, використовується коліматор із дзеркальним об'єктивом у вигляді позаосьової параболи 4. У фокальній площині об'єктива коліматора встановлюється тест-об'єкт, виконаний у вигляді непрозорого прямокутного сегмента кола із прозорим перехрестям 2, який освітлюється за допомогою конденсора джерелом випромінювання – галогенною лампою 1. Дзеркало 3 призначено для повороту світлового пучка. Сканер, що контролюється, розташовується на окремій підставці, що має можливість повороту навколо двох взаємно перпендикулярних осей таким чином, щоб світловий пучок коліматора повністю освітив вхідну зіницю сканера. Контрольний елемент сканера виконаний у вигляді багатогранної призми 6 з п'ятьма гранями, що відбивають, розташованими під кутами, відповідними до кутового розміру фотоприймальних лінійок сканера. Перед об'єктивом сканера додатково встановлюється оптичний клин 5, який має можливість повороту на 180° . При цьому, залежно від положення клина, світловий пучок коліматора збирається об'єктивом сканера або на лівих (рис. 6.2,б), або на правих фотоприймальних лінійках. Вимірювальний фотоелектричний автоколіматор (ФАК) 9 розташований так, що у верхню частину його вхідної зіниці попадає

світловий пучок коліматора, а в нижній частині вхідної зіниці перебуває контрольний елемент сканера.

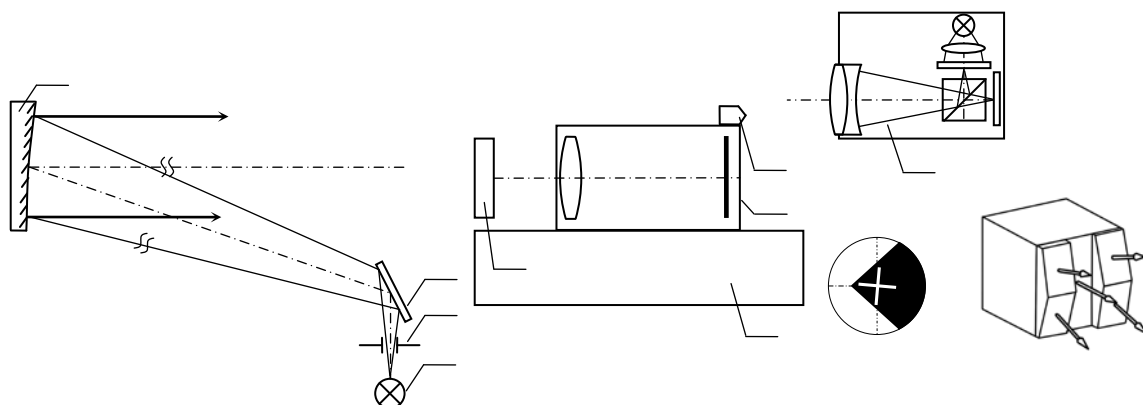


Рис. 6.2. а [207] – оптична схема колімаційного вимірювального комплексу: 1 – джерело випромінювання; 2 – марка; 3 – плоске дзеркало; 4 – параболічне дзеркало; 5 – клин; 6 – контрольний елемент у вигляді багатогранної призми; 7 – сканер ДЗЗ; 8 - рухома підставка сканера; 9 – фотоелектричний автоколіматор; б – вид марки; в – вид контрольного елемента, де N_i – положення нормалей до граней КЕ

Метод калібрування полягає в «прив'язці» кутового положення крайніх зон фотоприймальних лінійок і нормалей до граней КЕ.

Спочатку, нахилом і поворотом рухомої підставки сканер встановлюється таким чином, щоб зображення марки коліматора будувалося на краю однієї із центральних лінійок сканера, наприклад, лівої (рис. 6.1 б). Піксель фотоприймальної лінійки, що лежить на бісектрисі прямого кута зображення сегмента кола марки, приймається за початок відліку.

Попередньо, для того, щоб визначити положення осі візування ФАК, перед його об'єктивом встановлюється кутовий відбивач 1, який відбиває падаючий світловий пучок строго у зворотному напрямку. При цьому координати центру зображення перехрестя марки ФАК відповідають положенню його осі візування. Потім кутовий відбивач виводиться зі світлового пучка ФАК і в поле його зору одночасно попадають світловий пучок коліматора й автоколімаційне зображення від «нульової» грані КЕ. Таким чином, зображення марки коліматора будується в площині матричного

приймача ФАК одночасно із зображенням автоколімаційної марки ФАК. На рис. 6.3,б умовно показані зображення марок у площині приймальної матриці ФАК. Точка $b_k(x_k, y_k)$ відповідає центру перехрестя зображення марки коліматора, точка $b_0(x_0, y_0)$ – центру автоколімаційного зображення марки ФАК, отриманого від «нульової» грані КЭ, $b_c(x_c, y_c)$ – центру автоколімаційного зображення марки ФАК, отриманого при «прив'язці» до кутового відбивача.

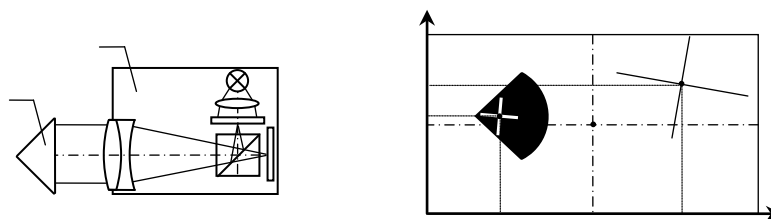


Рис. 6.3. а [207] – визначення кутових координат положення осі візування ФАК: 1- призма БкР-180°; 2 – фотоелектричний автоколіматор; б – визначення кутового положення нормалі до «нульової» грані КЕ відносно ВО коліматора в площині приймальної матриці ФАК

По отриманим координатах точок, розраховується кутове положення проєкції нормалі до «нульової» грані МП щодо візирної осі ФАК у горизонтальній і вертикальній площині за формулами:

$$\alpha_{x0} = \frac{x_0 - x_c}{2f'_{\text{фак}}} \cdot P_{\text{фак}}; \quad (6.1)$$

$$\alpha_{y0} = \frac{y_0 - y_c}{2f'_{\text{фак}}} \cdot P_{\text{фак}}, \quad (6.2)$$

де $P_{\text{фак}}$ – розмір пікселя матриці ФАК; $f'_{\text{фак}}$ – фокусна відстань ФАК.

Складові кута між віссю візування коліматора, що проходить через центр перехрестя його трикутної марки, і віссю візування ФАК розраховуються за формулами:

$$\beta_x = \frac{x_k - x_c}{f'_{\text{фак}}} \cdot P_{\text{фак}} \cdot \rho'; \quad (6.3)$$

$$\beta_y = \frac{y_k - y_c}{f'_{\text{фак}}} \cdot P_{\text{фак}} \cdot \rho'. \quad (6.4)$$

Для того, щоб зв'язати візирні осі суміжних фотоприймальних лінійок сканера, оптичний клин по черзі встановлюється у два положення, повернутих на 180° . У першому положенні клина зображення марки коліматора будується на лівій лінійці, у другому – на правій. Схематичне зображення фотоприйманих лінійок і зображення марки коліматора показані на рис.6.4. На границях трикутної зони зображення марки лівої центральної лінійки (рис. 6.4, б) знімаються два відліки L'_{10} й L''_{10} , де перший індекс відповідає номеру лінійки, другий – краю лінійки (верхній край – 0, нижній – 1). Після повороту клина знімаються наступні два відліки R'_{11} й R''_{11} на правій центральній лінійці. За отриманим даними визначаються номери «нульових» пікселів L_{10} лівої і R_{11} правої лінійок, відповідних до середини діапазону перенакладення країв лінійок, як цілого від середнього значення відліків за формулами:

$$L_{10} = \frac{1}{2} \cdot (l_{10} + N - r_{11}); \quad (6.5)$$

$$R_{11} = \frac{1}{2} \cdot (r_{11} + N - l_{10}), \quad (6.6)$$

де:

$$l_{10} = \frac{L'_{10} + L''_{10}}{2}, \quad r_{11} = \frac{R'_{11} + R''_{11}}{2}, \quad (6.7)$$

N – число пікселів лінійки сканера.

Відповідно, розмір зони перенакладання лінійок дорівнює:

$$\Delta L_{10} = \Delta R_{11} = 2 \cdot L_{10}. \quad (6.8)$$

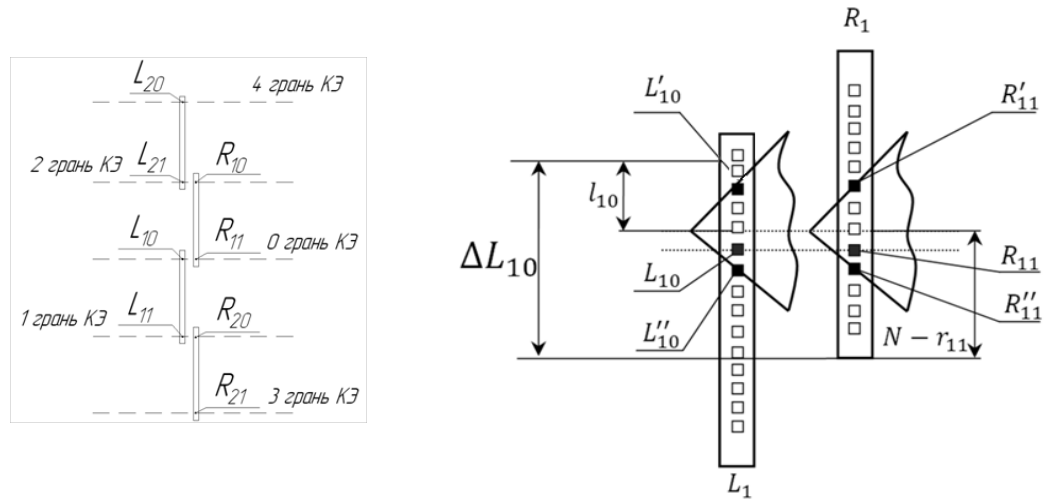


Рис. 6.4. а [207] – вигляд лінійок сканера; б – розмір зони перенакладання пікселів суміжних лінійок

Отримані значення відліків також дозволяють визначити кути між центрами крайніх зон лінійок сканера в горизонтальній площині за формулою (рис. 6.5)

$$\phi_{11} = 2 \cdot \psi - \frac{P_{ск}}{2 \cdot f'_{ск}} [(L''_{10} - L'_{10}) - (R'_{11} - R''_{11})], \quad (6.9)$$

де $f'_{ск}$ – фокусна відстань сканера, $P_{ск}$ – розмір пікселя лінійки сканера, ψ – кут відхилення променя клином.

Кут γ_{0y} між візирною віссю сканера й нормаллю до «нульової» грані КЕ (рис. 6.6 а) визначається як різниця кута між ВО коліматора і сканера γ'_{0y} і кута між ВО коліматора і нормалі до «нульової» грані МП γ''_{0y} у вертикальній площині за формулою:

$$\gamma_{0y} = \gamma'_{0y} - \gamma''_{0y} = \pi - \varepsilon_y + \frac{l_{10} - L_{10}}{f'_{ск}} P_{ск} - \left(\frac{y_0 + y_c}{2} - y_k \right) \frac{P_{фак}}{f'_{фак}}. \quad (6.10)$$

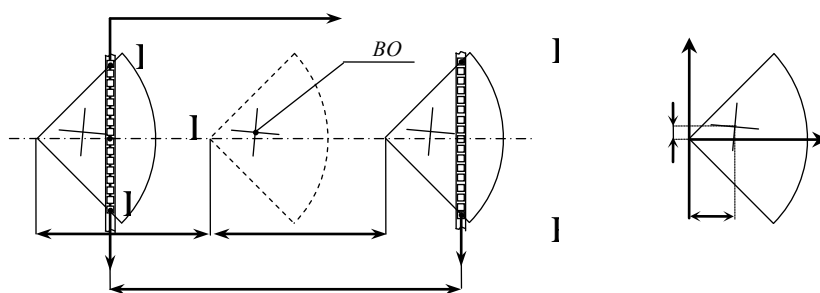


Рис. 6.5. [207] а – схема взаємного розташування марки коліматора і лінійок у фокальній площині сканера; N – номер пікселя (відлік зверху вниз), L_{10} – нульовий піксель сканера, ψ – кут відхилення променя клином; б – координати центру хреста марки щодо вершини прямого кута

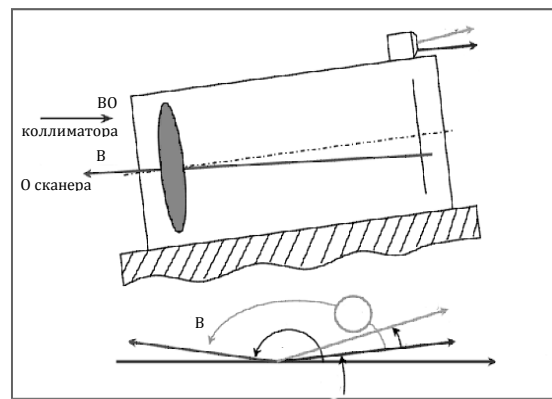
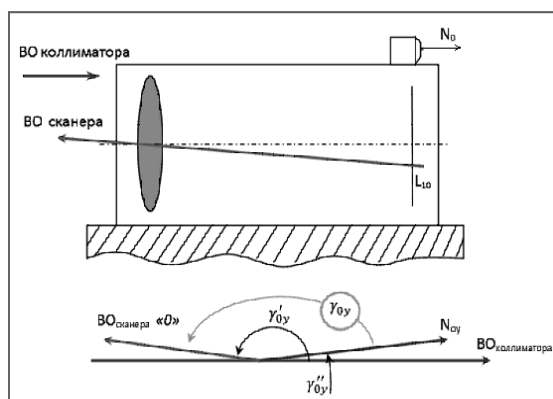


Рис. 6.6. [207] Схема розташування ВО сканера і коліматора щодо нормалей МП у вертикальній площині: а – у початковому положенні сканера; б – при нахилі сканера

Аналогічним чином визначаються всі інші кути між проекціями ВО сканера, відповідними до середин перенакладення периферичних зон фотоприймальних лінійок і нормалей до відповідних до граней КЕ на вертикальну площину.

Для цього сканер нахиляється щодо нульового положення на кут θ_i , де $i=1\dots 4$ – номер грані КЕ, як показано на рис. 6.6,б. Значення кута θ_i дорівнює куту між «нульовим» і i -ою гранями КЕ. Світловий потік ФАК,

відбившись від i -ої грані КЕ, фокусується на матрицю ФАК із центром у точці b_i з координатами x_i, y_i .

Потім виконуються розрахунки кута між проекціями ВО сканера і нормалі до i -ої грані КЕ у вертикальній площині γ_{iy}

$$\gamma_{iy} = \gamma_{iy}' - \gamma_{iy}'' = \pi - \varepsilon_y + \frac{s_{ik} - S_{ik}}{f_{ck}'} P_{ck} - \left(\frac{y_0 + y_c}{2} - y_k \right) \frac{P_{\Phi AK}}{f_{\Phi AK}'} + \mu_i, \quad (6.11)$$

$$\text{де } s_{ik} = \begin{cases} l_{ir} & \text{для лівих лінійок;} \\ r_{ik} & \text{для правих лінійок,} \end{cases} \quad S_{ik} = \begin{cases} L_{ir} & \text{для лівих лінійок;} \\ R_{ik} & \text{для правих лінійок,} \end{cases}$$

$i=1\dots 4$ – номер грані КЕ, $k=0$ для верхнього краю лінійки і $k=1$ для нижнього краю лінійки, ε_y – кутова відстань між вершиною прямого кута і центром хреста трикутної марки коліматора, яка розраховується за формулою (рис. 6.5,б)

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{f_{\text{кол}}'}. \quad (6.12)$$

Кут нахилу кожної лінійки сканера розраховується за виміряними значеннями номерів пікселів лінійки на границях зображення трикутних зон марки коліматора (рис. 6.7). Відповідні відрізки на лінійці позначимо як:

$$\begin{aligned} d'_{Li} &= S_{i0}'' - S_{i0}'; \\ d''_{Li} &= S_{i1}' - S_{i0}''; \\ D_{Li} &= \frac{1}{2}(S_{i1}'' - S_{i1}' - S_{i0}'' + S_{i0}'), \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$\text{де } S_{ik} = \begin{cases} L_{ik} & \text{для лівих лінійок;} \\ R_{ir} & \text{для правих лінійок.} \end{cases}$$

Тоді формула для розрахунків кутів нахилу лінійки

$$\omega_{Li} = \arccos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{D_{Li}}{d'_{Li} + d''_{Li}} + \sqrt{2 - \frac{D_{Li}^2}{(d'_{Li} + d''_{Li})^2}} \right) \right]. \quad (6.14)$$

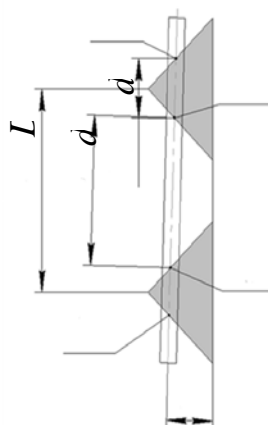


Рис. 6.7. [207] Кутове відхилення лінії реєстрів фотоприймальних лінійок відносно вертикальної осі сканера

6.2 Радіометричне калібрування систем дистанційного зондування

Метою радіометричного калібрування апаратури ДЗЗ є забезпечення єдиних підходів при вимірюванні та експлуатації систем ДЗЗ для отримання достовірних чисельних даних про об'єкти зондування. Обов'язковими ознаками якості отриманих даних є: 1) отримання даних в світових еталонах фізичних величин, які виражені в одиницях міжнародної системи СІ; 2) зазначення похибок і відомостей по невизначеність вимірювань; 3) проведення періодичного контролю стабільності характеристик апаратури та валідації даних в процесі експлуатації.

До основних радіометричних характеристик ОЕС ДЗЗ, які потребують обов'язкового передпольотного калібрування, слід віднести [208]:

- 1) Спектральні характеристики чутливості;
- 2) Градуировані характеристики функції передачі сигналу та їх лінійність;
- 3) Рівномірність чутливості по полю зору;
- 4) Характеристики шумової складової сигналу на виході та радіометричне розділення;
- 5) Світлорозсіювання;
- 6) Поляризаційна чутливість;
- 7) Радіометрична точність;
- 8) Стабільність радіометричних характеристик.

З метрологічної точки зору ОЕС ДЗЗ – це вимірювальний перетворювач, який призначений для перетворювання величини, що вимірюється на вході, в виміряні сигнали на виході, які можуть передаватися, оброблятися та зберігатися.

Найважливішим етапом радіометричного калібрування є передача одиниці радіометричної величини від еталона до робочих випромінювачів системи радіометричного калібрування (СРК) і приймачів ОЕС, тобто на цьому етапі відбувається абсолютизація вимірювань характеристик і параметрів ОЕС і їх прив'язка до національних та міжнародних еталонів і повимірювальних схем. Радіометричне калібрування частково відбувається на стадії виробничих процесів і є обов'язковим при передпольотній підготовці [209].

В цьому підрозділі розглянуто тільки питання радіометричного передпольотного калібрування.

Незважаючи на різноманіття конструктивного виконання приладів ДЗЗ і ряд відмінностей, властивих їм (спектральний діапазон, миттєве поле зору, кут огляду і т.п.), усі вони можуть розглядатися як чутливі в n робочих спектральних інтервалах радіометри-яскравоміри, тому що їхні миттєві поля зору при вимірюваннях повністю перекриваються досліджуваною поверхнею. Через те, що реально вимірювана ними фізична величина є яскравість, то ж і градування їх енергетичних шкал необхідно здійснювати в одиницях енергетичної яскравості або в одиницях спектральної щільності енергетичної яскравості (СЩЕЯ). Радіометричне калібрування полягає в знаходженні в кожному спектральному каналі залежності між цифровими відліками DN_i на виході приладу ДЗЗ та значень СЩЕЯ L_i на вхідній апертурі сенсора. Така лінійна градувальна характеристика між DN_i та L_i , яка враховує калібрувальні коефіцієнти підсилення G та зміщення B , дасть змогу зіставляти та порівнювати результати космічної зйомки від різних ОЕС ДЗЗ в одних одиницях [210]

$$L_i = G_i D N_i + B_i. \quad (6.15)$$

Можливі декілька методів радіометричного калібрування.

Перший метод використовує, як основу при побудові схем енергетичного калібрування систем ДЗЗ, діючий ГОСТ 8.195-89 «Державна повіряльна схема для засобів вимірювання спектральної щільності енергетичної яскравості, спектральній щільності сили випромінювання і спектральної щільності енергетичної освітленості в діапазоні довжин хвиль 0,25 – 25,00 мкм; сили випромінювання і енергетичної освітленості в діапазоні довжин хвиль 0,2 – 25,00 мкм» [211], що базується на порівнянні з еталонним джерелом випромінювання.

Другий метод базується на використанні абсолютного радіометру .

По першому методу радіометричного калібрування одиниця СЩЕЯ від Державного первинного еталона передається робочому еталону, який базується на групі стрічкових ламп і моделей чорного тіла [212]. Від робочого еталона одиниця СЩЕЯ передається зразковим засобам вимірів 1-го розряду (ЗЗВ), які повинні використовуватися на етапі градуювання систем ДЗЗ. У силу особливостей оптичних схем сканерів безпосереднє їх градуювання по ЗЗІ джерелами випромінювання, в яких є групи стрічкових ламп і моделей чорного тіла, неможлива, тому необхідні пристрої для геометричного узгодження таких приладів з ЗЗВ – спеціальні градуювальні стенди. Ці стенди повинні містити засоби калібрування, що градуюються по ЗЗВ та дозволяють безпосередньо проводити операції калібрування систем ДЗЗ. Доцільно визначати абсолютну чутливість приладу ДЗЗ за допомогою рівнояскравого протяжного джерела, яке повинен забезпечувати повне заповнення миттєвого поля зору оптичної системи приладу. На практиці в якості протяжного джерела знайшли застосування екрани, що дифузно розсіюють, з попередньо вимірюваними спектральними характеристиками, які освітлюються атестованим джерелом випромінювання [213], а також

неповні інтегруючі сфери, яскравість яких можна оперативно визначити методом компарування з ЗЗВ [214–220].

Перевага екранів, що розсіюють, – відносно невеликі габарити і простота. Однак для забезпечення високих значень енергетичної яскравості для підсвічування екранів необхідно використовувати потужні дугові лампи, які не завжди можуть бути застосовані через низьку стабільність їх випромінювання.

Інтегруючі сфери забезпечують кращі метрологічні характеристики, хоча і мають більші габарити. Важливою перевагою інтегруючої сфери є можливість використання для підсвічування її внутрішньої поверхні декількох малопотужних джерел випромінювання, причому їх взаємне положення й кількість може змінюватися для плавної зміни енергетичної яскравості вихідного отвору інтегруючої сфери без зміни спектрального складу випромінювання.

Як показано в роботі [221] повна освітленість E внутрішньої поверхні інтегруючої сфери в будь-якій точці (тобто після додавання прямої освітленості і усієї освітленості після багаторазового відбивання усередині сфери) дорівнює:

$$E = E_1 + \frac{F}{4\pi R^2} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad (6.16)$$

де E_1 – пряма освітленість внутрішньої поверхні сфери від джерела випромінювання; F – потік випромінювання від джерела випромінювання сфери; R – внутрішній радіус інтегрувальної сфери; ρ – коефіцієнт відбиття внутрішньої поверхні сфери.

Другий член виразу (6.16) прямо пропорційний потоку випромінювання джерела, однаковий для всіх ділянок внутрішньої поверхні сфери і не залежить від розподілу потоку випромінювання джерела (тобто від сили випромінювання в різних напрямках).

В свою чергу пряма освітленість E_I , як правило, не однакова для всіх ділянок внутрішньої поверхні сфери і залежить від розподілу потоку випромінювання джерела. У зв'язку з цим при конструюванні інтегруючих сфер джерела випромінювання розташовують таким чином, щоб вони не освітлювали ту частину внутрішньої поверхні сфери, яка буде використовуватись при енергетичному калібруванні систем ДЗЗ, або вводять випромінювання джерел у інтегруючу сферу за допомогою пристосувань, що дифузно розсіюють. В якості таких джерел використовують молочне скло, яке працює на пропускання або на відбивання. В цьому випадку формула (6.16) приймає вигляд [222]

$$E = \frac{F}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{1-\rho}. \quad (6.17)$$

Слід зазначити, що у формулу (6.17) входить співмножник $\frac{1}{1-\rho}$, який умовно можна назвати коефіцієнтом підсилення інтегруючої сфери, тому що при більших значеннях ρ додаткова освітленість, що виникає за рахунок багаторазового відбивання від внутрішньої поверхні сфери, може виявитися значно більше прямої освітленості E_I . Так з формули (6.17) видно, що при $\rho = 0,8$ додаткова освітленість в 4 рази (а при $\rho = 0,9$ - в 9 разів) перевершує пряму освітленість E_I .

Крім того, на поверхні сфери є кілька отворів. Кожне з отворів слід розглядати як таку ділянку загальної площі S сфери з коефіцієнтом відбиття $\rho = 0$, який поглинає весь падаючий на нього потік. У цьому випадку формули (6.16) та (6.17), як показано в роботах [223] та [224], мають вигляд:

$$E = \frac{F}{4\pi R^2} \cdot \frac{\rho}{1-\rho'}; \quad (6.18)$$

$$E = \frac{F}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{1-\rho'}, \quad (6.19)$$

де $\rho' = \rho \left(1 - \frac{S_o}{S} \right)$ можна назвати ефективним коефіцієнтом відбиття внутрішньої поверхні інтегруючої сфери, S_o – площа отворів в сфері, $S = 4\pi R^2$ – загальна площа внутрішньої поверхні інтегруючої сфери.

Інтегруюча сфера забезпечує кращу просторову й кутову рівномірність яскравості L поверхні, ніж екран. Відповідно до монографії [224] яскравість L для поверхонь, що ідеально розсіюють та підкоряються закону Ламберта (закону косинусів), що має місце для інтегруючої сфери, визначається за формулою

$$L = \rho \frac{E}{\pi}, \quad (6.20)$$

де E – освітленість внутрішньої поверхні сфери відповідно до формул (6.18) або (6.19).

Для покращення просторової і кутової рівномірності яскравості необхідно витримати певне співвідношення між діаметром вихідного отвору інтегруючої сфери і її внутрішнім діаметром.

У роботі [222] наведені характеристики інтегруючих сфер, розроблених провідними аерокосмічними країнами світу, а саме Росією, США, Японією, Німеччиною, для енергетичного калібрування багатозональних сканерів штучних супутників Землі серії «Ресурс», «Landsat», «JERS», «DAIS» і інших. Діаметри сфер становлять 1...2 метра, діаметри вихідних отворів сфер – 0,23...0,8 метра, кількість ламп – 8...12 штук, потужність кожної лампи – 150...500 Вт, сумарна потужність ламп – 1500...6000 Вт, спектральний діапазон випромінювання від 0,3...0,4 мкм до 1,2...2,5 мкм, відношення діаметра вихідного отвору сфери до її внутрішнього діаметра – 0,23...0,4.

Крім наведених вище характеристик інтегруючих сфер тут додатково наведені такі характеристики як просторова неоднорідність яскравості – $\leq 1\%$, стабільність у часі – $0,1 \div 1,1\%$ і стандартна невизначеність СПЭЯ –

0,3÷3,25%. Причому в США остання характеристика лежить у межах 0,3÷3,1 %, а для Росії вона дорівнює 3,25% і визначається винятково похибкою передачі одиниці СЩЕЯ від ЗЗВ до інтегруючої сфери, тому що інші складові похибки зведені до значень, які не перевищують 1%.

Проведення передачі одиниці СЩЕЯ до ЗЗВ безпосередньо від первинного еталона забезпечить зменшення стандартної невизначеності відтворення СЩЕЯ ЗЗВ з 0,75...1,4% до 0,5...1,0 % у спектральному інтервалі 0,4 – 1,0 мкм [211].

Таким чином, співвідношення діаметра вихідного отвору інтегруючої сфери до її внутрішнього діаметра, яке перебуває в інтервалі 0,2...0,4 будемо вважати прийнятним для одержання високих метрологічних характеристик інтегруючої сфери. Для сканерів надвисокої роздільної здатності, в яких діаметр вхідної апертури досягає 700 мм, потрібен вихідний отвір інтегруючої сфери 800 мм, а діаметр інтегруючої сфери не менш ніж 2 м. Сумарна потужність ламп інтегруючої сфери, може досягати 6000 Вт, тому для відводу зайвого тепла від інтегруючої сфери необхідно застосовувати водяне охолодження.

Відзначимо також, що у формулу (6.20), по якій визначається яскравість внутрішньої поверхні сфери, входять спектрально залежні величини, тому її можна переписати в наступному вигляді:

$$L(\lambda) = \rho(\lambda) \frac{E(\lambda)}{\pi}. \quad (6.21)$$

Яскравість системи «поверхня Землі–атмосфера», що вимірюється ОЕС ДЗЗ, також є спектрально залежною величиною і може приймати різні значення на різних довжинах хвиль. До того ж чутливість каналів ОЕС ДЗЗ має різні значення на різних довжинах хвиль, тому сигнал на виході кожного спектрального каналу системи ДЗЗ буде описуватися виразом:

$$U_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda, \quad (6.22)$$

де U_i - вихідний сигнал в i -му каналі ОЕС ДЗЗ, λ_1, λ_2 - межі зони спектральної чутливості i -го каналу, $L(\lambda)$ - СЩЕЯ системи «поверхня Землі – атмосфера», $S_i(\lambda)$ – абсолютна спектральна чутливість i -го каналу ОЕС ДЗЗ.

Звідси випливає, що для визначення яскравості системи «поверхня Землі – атмосфера» з результатів вимірів U_i необхідно знати абсолютну спектральну чутливість кожного спектрального каналу системи ДЗЗ.

Логічно проводити визначення абсолютної спектральної чутливості каналів систем ДЗЗ по дифузійному протяжному монохроматичному випромінювачу, однак енергетика такого випромінювача буде недостатня для забезпечення необхідного відношення сигнал/шум на виході системи ДЗЗ. Градування за абсолютним значенням за допомогою інших типів монохроматичних випромінювачів, наприклад коліматорного, малоефективна через труднощі створення рівномірної яскравості по площі і по куту такого випромінювача. З погляду забезпечення більш високої точності доцільним виявився метод роздільного визначення відносної спектральної чутливості і абсолютизації її значення за допомогою інтегрального дифузійного випромінювача, тобто інтегруючої сфери [223].

Для вимірювання відносних спектральних характеристик $\bar{S}_i(\lambda)$ повинен використовуватися монохроматичний випромінювач із відомою функцією відносного спектрального розподілу яскравості вихідного випромінювання $\bar{L}_M(\lambda)$ [218,224,221,227,225], що заповнює вхідну зіниця системи ДЗЗ у межах тілесного кута її поля зору [217].

У результаті вимірювання відгуків $U_i(\lambda)$ кожного спектрального каналу системи ДЗЗ на випромінювання монохроматичного випромінювача у вузьких спектральних інтервалах, центрованих на λ , що змінюється із заданим кроком по довжині хвилі, визначаємо деяку функцію $K_i(\lambda)$:

$$K_i(\lambda) = \frac{U_i(\lambda)}{L_M(\lambda)}. \quad (6.23)$$

Так як можливий вплив на спектральні характеристики відмінності в кутах падіння променів у межах поля зору системи ДЗЗ (особливо для ширококутних систем ДЗЗ), то слід провести зазначені виміри для N кутових положень системи ДЗЗ та визначити функцію $K_i(\lambda)$ для кожного пікселя фотоприймача.

Відносна спектральна характеристика чутливості випромінювача після нормування функції $K_i(\lambda)$ до її максимального значення

$$\bar{S}_i(\lambda) = \frac{K_i(\lambda)}{[K_i(\lambda)]_{MAX}}. \quad (6.24)$$

Через те, що ОЕС ДЗЗ працює в широкому динамічному діапазоні зміни яскравості системи «поверхня Землі – атмосфера», який досягає кілька порядків (до 5 порядків), те необхідно перевіряти лінійність градуювальних характеристик систем ДЗЗ у робочому динамічному діапазоні зміни вимірюваної яскравості.

У роботі [226] відзначено, що сигнали на виході кожного каналу системи ДЗЗ функціонально пов'язані з ефективною енергетичною яскравістю (ЕЕЯ) L_i системи «поверхня Землі – атмосфера»:

$$L_i = \int_0^{\infty} L(\lambda) \bar{S}_i(\lambda) d\lambda. \quad (6.25)$$

При використанні в якості вимірюваної величини ЕЕЯ градуювальна характеристика для ОЕС ДЗЗ реалізується, як правило, у вигляді лінійної функції

$$U_i = DN_i = g_i L_i + b_i. \quad (6.26)$$

яка для визначення значень яскравості L за результатами прямих вимірів на етапі обробки знімків представляється у вигляді (6.15), де g_i , b_i , G_i та B_i – коефіцієнти, що визначаються в процесі калібрування системи ДЗЗ.

Більш висока універсальність використання радіометричних даних зйомки забезпечується при переході від градуовальних характеристик у функції ЕЕЯ до градуовальних характеристик у функції або СЩЕЯ, або, позаатмосферної спектральної відбиваючої здатності ρ_λ . При цьому з'являється можливість оцінки спектральних характеристик об'єктів зйомки за допомогою багатозональної системи ДЗЗ і забезпечення порівняння результатів вимірів, виконаними різними зразками такої апаратури. На практиці подібний перехід здійснюється за допомогою введення двох параметрів, що характеризують спектральні властивості апаратури: еквівалентної ширини спектральної зони $\Delta\lambda_e$ чутливості кожного спектрального каналу системи ДЗЗ і еквівалентної довжини хвилі λ_e кожного спектрального каналу системи ДЗЗ.

Існують різні способи визначення їх значень [227–230]. Найчастіше, зокрема в системах «Landsat», NOAA і SPOT, користуються співвідношеннями [229]:

$$\Delta\lambda_{e,j} = \int_0^\infty \bar{S}_j(\lambda) d\lambda, \quad (6.27)$$

$$\lambda_{e,j} = \frac{\int_0^\infty \lambda \bar{S}_j(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \bar{S}_j(\lambda) E(\lambda) d\lambda}, \quad (6.28)$$

де j – номер спектральної зони знімальної апаратури.

Для переходу від ЕЕЯ L_j до СЩЕЯ $L_{\lambda,j}$ на еквівалентній довжині хвилі $\lambda_{e,j}$ використовується співвідношення:

$$L_{\lambda,j} = \frac{L_j}{\Delta\lambda_{e,j}}. \quad (6.29)$$

Параметри L_λ і ρ_λ зв'язані між собою за допомогою множника E_λ/π та значенням відстані від Землі до Сонця d і значенням зенітної відстані Сонця Z [230]:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi d^2}{\cos Z \frac{L(\lambda)}{E(\lambda)}}, \quad (6.30)$$

де $E(\lambda)$ - спектральна сонячна стала.

У цьому випадку градувальні характеристики мають вигляд, аналогічний (6.15) і (6.26):

$$\begin{cases} DN_i = g_i L_i + b_i; \\ L_i = G_i DN_i + B_i; \\ DN = p \rho_{\lambda} + q; \\ \rho_{\lambda} = P DN + Q, \end{cases} \quad (6.31)$$

де $g_i, b_i, G_i, B_i, p, q, P, Q$ - градувальні коефіцієнти.

Одержання певних у такий спосіб вимірюваних величин базується на комплексі взаємозалежних прямих і непрямих вимірювань.

Вимірювання градувальної характеристики, як функції абсолютної ЕЕЯ можна здійснювати або по інтегральному випромінювачу, що градуйований по ЕЕЯ у відносних одиницях \bar{L} , з подальшою абсолютизацією шкали відносної яскравості за допомогою інтегральної сфери, або безпосередньо по інтегральній сфері, градуйований на ряд фіксованих значень ЕЕЯ. При цьому спектральний склад випромінювання не повинен змінюватися. Так як зазначений вище динамічний діапазон вимірювання яскравості без зміни спектрального складу випромінювання реалізувати за допомогою інтегруючої сфери важко, то зазвичай, використовують перший спосіб.

Таким чином, вимір градувальної характеристики як функції ЕЕЯ у відносних одиницях \bar{L} потрібно здійснювати за допомогою інтегрального випромінювача, що забезпечує змінний з певним кроком потік випромінювання на вході системи ДЗЗ. По зареєстрованих вихідних сигналах U_i кожного спектрального каналу в межах заданого динамічного діапазону вхідних сигналів будуються градувальні характеристики $U_i(\bar{L})$

кожного спектрального каналу системи ДЗЗ, що калібрується. Для формування вхідних потоків можуть застосовуватися різні методи: використання закону квадратів, фільтровий метод, метод додавання світла і т.п..

Абсолютизація відносних градуовальних $U_i(\bar{L})$ і відносних спектральних $S_i(\lambda)$ характеристик здійснюється за рахунок передачі розміру одиниці СЩЕЯ $L_D(\lambda)$ від протяжного дифузійного джерела випромінювання – інтегруючої сфери. При опроміненні вхідної зіниці системи ДЗЗ дифузійним джерелом сигнал $U(L_D)$ одного з її спектральних каналів буде дорівнювати:

$$U(L_D) = \int_0^{\infty} L_D(\lambda) S(\lambda) d\lambda = S_{MAX} \int_0^{\infty} L_D(\lambda) \bar{S}(\lambda) d\lambda = S_{MAX} L_D, \quad (6.32)$$

де S_{MAX} - множник абсолютизації, $L_D = \int_0^{\infty} L_D(\lambda) \bar{S}(\lambda) d\lambda$ - ЕЕЯ дифузійного джерела, значення якої можна розрахувати, тому що всі підінтегральні величини відомі.

Тоді множник абсолютизації визначається за формулою

$$S_{MAX} = \frac{U(L_D)}{L_D} \quad (6.33)$$

і використовується для одержання абсолютної спектральної характеристики чутливості цього спектрального каналу системи ДЗЗ:

$$S(\lambda) = S_{MAX} \bar{S}(\lambda). \quad (6.34)$$

Для абсолютизації градуовальної характеристики $U(\bar{L})$ як функції ЕЕЯ необхідно по цій характеристиці знайти значення \bar{L}_D , яке відповідає значенню виміряного вихідного сигналу $U(L_D)$, і поставити його у відповідність дійсному значенню L_D ЕЕЯ дифузійного джерела:

$$\frac{\bar{L}_D}{L_D} = \frac{\bar{L}}{L}. \quad (6.35)$$

Звідки випливає співвідношення:

$$L = \frac{L_D}{\bar{L}_D} \bar{L}, \quad (6.36)$$

по якому виміряна градувальна характеристика $U(\bar{L})$ перетворюється в градувальну характеристику $U(L)$, що виражена в абсолютних одиницях ЕЕЯ.

Висока рівномірність розподілу яскравості по вихідному отвору інтегруючої сфери дозволяє вимірювати з її допомогою нерівномірність вихідних сигналів систем ДЗЗ при візуванні рівнояскравої поверхні. У процесі вимірювань реєструються середні значення сигналів кожного n -го пікселя приймальні лінійки U_n . Тоді середнє значення сигналу по всій прийомній лінійці одного зі спектральних каналів системи ДЗЗ буде

$$U_{CP} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n, \quad (6.37)$$

де N – кількість пікселів у лінійці.

Значення нерівномірності чутливості пікселів прийомної лінійки цього каналу визначається за формулою

$$\Delta U = \frac{U_n - U_{CP}}{U_{CP}} = \frac{U_n}{U_{CP}} - 1. \quad (6.38)$$

Враховуючи надалі отримані флуктуації чутливості кожного пікселя приймальні лінійки шляхом введення відповідних корегувань, можна добитися однакової чутливості по всій довжині лінійки. При цьому усувається і нерівномірність опромінення прийомної лінійки, яка викликана абераціями оптичного тракту системи ДЗЗ.

Проведена абсолютизація градувальних характеристик дозволяє формувати на вході системи ДЗЗ задані рівні ЕЕЯ і проводити на них вимірювання значень відношення сигнали/шум. Реалізація необхідних

вхідних сигналів може здійснюватися за допомогою того ж інтегрального випромінювача, який використовувався для вимірювання градувальних характеристик.

Таким чином, градувальний стенд по першому методу повинен містити три джерела: монохроматичний випромінювач, інтегральний випромінювач і дифузійний випромінювач, які в сукупності являють собою засоби енергетичного калібрування систем ДЗЗ. Вони повинні бути попередньо градуйовані: монохроматичний випромінювач – у відносних одиницях СЩЕЯ, інтегральний випромінювач - у відносних одиницях ЕЕЯ, а дифузійний випромінювач – в абсолютних одиницях СПЭЯ по робочому еталону або по ОСІ 1-го розряду.

Кожний із трьох джерел може мати досить великі габарити в декілька метрів і тому для того, щоб випромінювання кожного з них могло бути подане по черзі на вхідну зіницю системи ДЗЗ, повинне бути передбачений пристрій комутації пучків їх випромінювання, що складається із системи плоских і сферичних дзеркал, які повинні мати можливість розвертатися навколо вертикальної осі. Це ж пристрій комутації пучків випромінювання потрібно використовувати і при градуванні зазначених джерел випромінювання по робочому еталону або ОСІ, причому таким чином, щоб їх коефіцієнти відбиття автоматично враховувалися при передачі одиниці енергетичної яскравості від робочого еталона або ОСІ системі ДЗЗ.

Крім того, як відзначено в статті [233] калібрування робочих випромінювачів по яскравості та СЩЕЯ супроводжується наступними основними похибками:

1. Похибка передачі одиниці СЩЕЯ від еталона;
2. Нестабільність калібрувальних випромінювачів;
3. Нелінійність та нестабільність спектрокомпаратора;
4. Невідторюваність встановлення довжини хвиль в монохроматорі та компараторі;
5. Неузгодженість спектральних характеристик випромінювачів;

6. Похибка геометричного базування калібрувальної схеми.

В існуючій установці «Камелія», що працює по такому методу, ці похибка складають 6,5% [218].

Для спрощення процедури калібрування, зменшення габаритів та ціни установки в КП СПБ «Арсенал» було прийнято рішення будувати універсальну установку для калібрування ОЕС ДЗЗ по другому методу, що базується на використанні абсолютного радіометру та дозволить проводити вимірювання світлотехнічних і енергетичних характеристик сканерів, вимірювання коефіцієнта розсіювання та спектральних коефіцієнтів пропускання об'єктів ОЕС ДЗЗ.

Структурно-функціональна схема стенду радіометричного калібрування ОЕС ДЗЗ для різних вимірювань представлена на рис. 6.8 і 6.9.

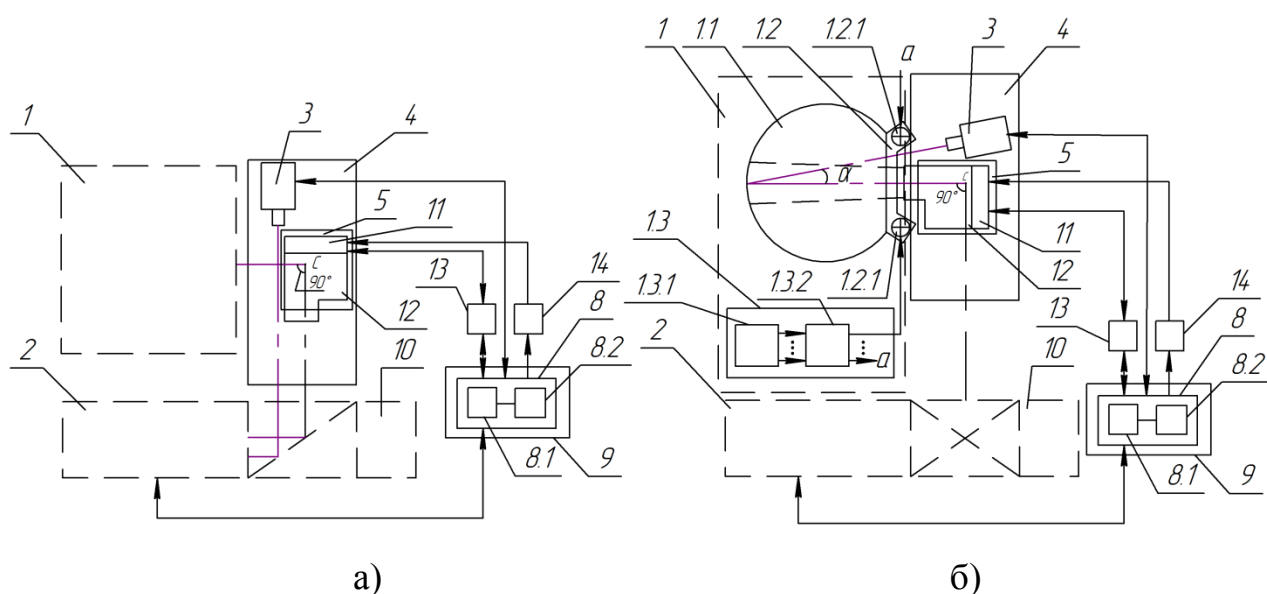


Рис. 6.8. Схема стенду радіометричного калібрування ОЕС ДЗЗ:

- а – відносної спектральної чутливості спектральних каналів;
- б – градуювальних характеристик, нерівномірності чутливості пікселів, відношення сигнал/шум, абсолютизації відносних спектральних характеристик спектральних каналів

До складу стенду радіометричного калібрування ОЕС ДЗЗ входять наступні основні вузли й блоки:

- блок випромінювача дифузійного 1, що складається з: інтегруючої сфери 1.1; освітлювача 1.2; лампи 1.2.1; стійки з приладами 1.3; блоків живлення 1.3.1 та 1.3.2;
- блок випромінювача монохроматичного 2;
- блок спектрорадіометра 3;
- стіл з віброопорами 4;
- блок закріплення і розворотів сканера 5;
- екран з отвором 6;
- блок фотоелектричного контролю 7, що складається з: корпусу з кронштейном 7.1; вимірювальних приладів 7.2;
- блок обробки, реєстрації і керування 8, що складається з: персонального комп'ютера 8.1 і принтера 8.2;
- робочий стіл 9;
- блок випромінювача інтегрального 10;
- вузол фокальної площини ОЕС ДЗЗ з фотоприймачами;
- об'єktiv ОЕС ДЗЗ.

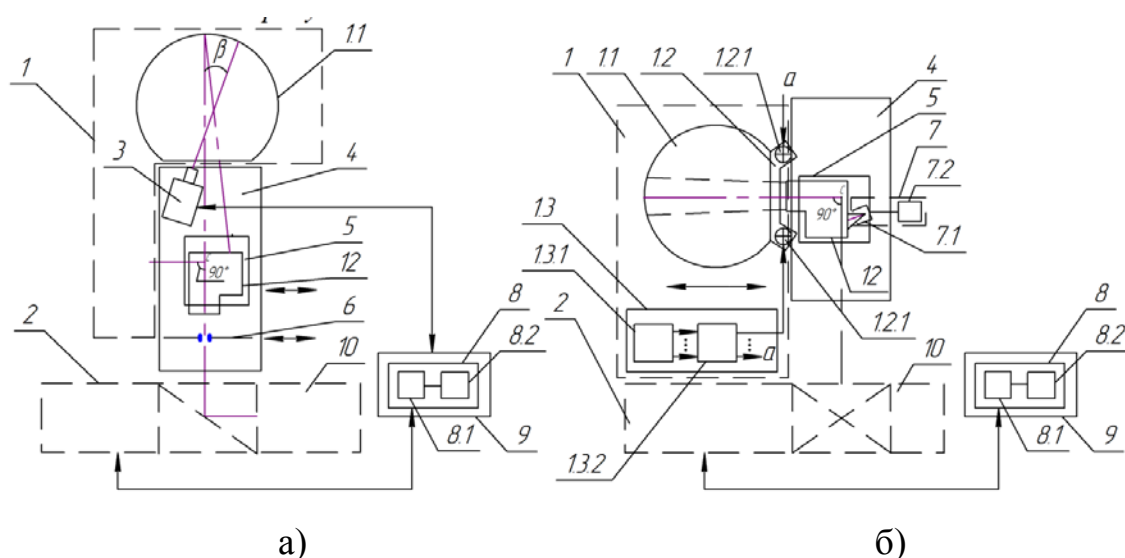


Рис. 6.9. Схема стенду радіометричного калібрування ОЕС ДЗЗ:

а – спектральних коефіцієнтів пропускання;

β – коефіцієнта розсіювання

Метод вимірювання абсолютної спектральної чутливості спектрального каналу сканера заснований на роздільному визначенні його відносної спектральної чутливості, за допомогою монохроматичного випромінювача, що перебудовується по довжині хвилі, і наступної абсолютизації її значення за допомогою дифузійного випромінювача, виконаного у вигляді неповної інтегруючої сфери. Монохроматичний випромінювач повинен бути прокалібрований у відносних одиницях СЩЕЯ, а дифузійний випромінювач - в абсолютних одиницях СЩЕЯ.

Вимірювання відносної спектральної чутливості спектрального каналу сканера засновано на вимірюванні його вихідних сигналів при опроміненні вхідної зіниці сканера монохроматичним випромінювачем, що змінюється по довжині хвилі, відносна СЩЕЯ якого вимірюється спектро радіометром. Потік випромінювання від монохроматора попадає на вхідну зіницю об'єктива ОЕС ДЗЗ за допомогою позаосьового параболічного дзеркала-коліматора.

В якості спектро радіометра обрано спектро радіометр PR-735 Spectrascan Systems корпорації Photo Research, Inc., який має наступні характеристики:

- спектральний діапазон 380...1080 нм;
- спектральна роздільна здатність – 3 нм;
- діапазон вимірювання яскравості – від 0,000171 до 9600000 кд/м²;
- абсолютна похибка по довжині хвилі < 0,8 нм;
- спектральне розділення 2 нм;
- відносна похибка вимірювання яскравості джерела А (2856 К) при $5,15 \cdot 10^{-3}$ кд/м² і полі зору $2^\circ - \pm 2 \%$;
- збіжність вимірювань яскравості джерела А (2856 К) при $5,15 \cdot 10^{-3}$ кд/м² і полі зору $2^\circ - \pm 1 \%$;
- поляризаційна похибка < 0,2 %.

Абсолютна амплітудна характеристика спектральних каналів ОЕС ДЗЗ в їх робочому діапазоні енергетичної яскравості заснована на вимірюванні вихідних сигналів при опроміненні вхідної зіниці сканера дифузійним випромінювачем, виконаним у вигляді неповної інтегруючої сфери, СЩЕЯ внутрішньої поверхні якої вимірюється спектро радіометром.

Метод вимірювання відношення сигнал/шум та нерівномірності чутливості пікселів в рядку аналогічна тій, що описана вище по першому методу.

Метод вимірювання спектральних коефіцієнтів пропускання об'єктива сканера заснована на порівнянні спектральної щільності спрямованого потоку випромінювання, що падає на об'єктив паралельно головному променю його поля зору, та спектральної щільності потоку випромінювання, що пройшов через об'єктив. Вимірювання виконується спектро радіометром через отвір неповної інтегруючої сфери із складу дифузійного випромінювача спектральні щільності енергетичної яскравості її внутрішньої поверхні, які пропорційні спектральній щільності потоку випромінювання, що надходить у внутрішню порожнину сфери через цей отвір. При цьому діаметр спрямованого пучка випромінювання, що падає на об'єктив сканера, повинен бути менше діаметра вхідної зіниці об'єктива, а діаметр розбіжного пучка випромінювання, що пройшов через об'єктив, на внутрішній поверхні сфери повинен бути якнайближче до діаметра спрямованого пучка випромінювання.

6.3 Вимірювання коефіцієнту розсіювання об'єктивів

Методи вимірювання коефіцієнта розсіювання об'єктивів визначаються стандартами [234–238], дія яких поширюється як на проєкційні і знімальні об'єктиви, так і на об'єктиви для спостереження (візуальні та з фотоприймачами), що входять до складу фотографічних, кінознімальних, аерофотографічних і телевізійних апаратів та камер. Стандартизований метод визначення коефіцієнта розсіювання таких об'єктивів та виробів [236–238] базується на порівнянні освітленості E_1 та E_2 в зображенні чорного предмета

(E_1), що розташований на рівномірно опромінену білому фоні, і в зображенні цього фону (E_2). Освітленості вимірюють фотоелектричним способом. Коефіцієнт розсіювання C виробу визначається відношенням освітленості E_1 до освітленості E_2 :

$$C = \frac{E_1}{E_2}. \quad (6.39)$$

До складу метрологічного обладнання для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів за стандартизованим методом має входити фотометрична куля з джерелами світла і коліматорним об'єктивом, імітатор чорного предмета, фотоприймач та вимірювальний прилад. Зображення чорного предмета та зображення фону мають створюватися об'єктивом, коефіцієнт розсіювання якого визначають, та коліматорним об'єктивом. Світловий діаметр коліматорного об'єктива має бути більший від діаметра вхідного отвору об'єктива, що контролюється, не менше ніж на 10%, його відносний отвір - не більше 1:5, а фокусна відстань - рівна внутрішньому діаметру фотометричної кулі, в вихідному отворі якої і знаходиться коліматорний об'єктив. Внутрішня поверхня фотометричної кулі має бути рівномірно освітлена джерелами світла, повинна мати високий коефіцієнт відбиття світла і використовується в якості рівномірно яскравого білого фону. На протилежній від вихідного отвору стороні внутрішньої поверхні фотометричної кулі знаходиться отвір, через центр якого проходить оптична вісь коліматорного об'єктива і за яким встановлено імітатор чорного предмета. Яскравість чорного предмета має бути не більше 0,001 яскравості внутрішньої поверхні фотометричної кулі. Відносна похибка визначення коефіцієнта розсіювання за вказаними стандартами не перевищує 10%.

Для космічних досліджень, зокрема для систем дистанційного зондування Землі, застосовуються високоякісні довгофокусні об'єктиви з великою вхідною апертурою. Фокусна відстань таких об'єктів $f' = 1000 \dots 12000$ мм, діаметр вхідної зіниці $D = 200 \dots 1500$ мм. У відповідності з стандартами при $D = 1500$ мм світловий діаметр

коліматорного об'єктива повинен бути 1650 мм, а його фокусна відстань, а отже і внутрішній діаметр фотометричної кулі – 8250 мм. Виготовлення фотометричної кулі таких розмірів з коліматорним об'єктивом та імітатором чорного предмету, як і її експлуатація, потребує значних витрат та пов'язана зі значними технологічними та експлуатаційними труднощами.

Найбільший відомий діаметр фотометричної кулі, що використовується для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів, 5000 мм [239]. Ця куля входить до складу «Установки для измерения светорассеивающих свойств оптических систем ФС-5000» (НИИКИ ОЭП, г. Сосновый бор, Россия) і призначена для вимірювання коефіцієнтів розсіювання великогабаритних (діаметр входної зіниці до 1500 мм) довгофокусних оптичних систем у видимій і ближній ІЧ ділянці спектра. Коефіцієнт розсіювання коліматорного об'єктива кулі ФС-5000 – 2,8%, світловий діаметр – 1560 мм, фокусна відстань – 4985 мм, тобто його відносний отвір – 1:3,2, що більше, ніж дозволяють діючі стандарти (не більше 1:5). Зрозуміло, що це спричинено виключно намаганням зменшити габарити фотометричної кулі навіть за рахунок недотримання вимог стандартів.

Для розв'язання цієї задачі було проведено пошук та обґрунтування іншого, відмінного від стандартизованого, методу визначення коефіцієнта розсіювання великогабаритних довгофокусних об'єктів, який зміг би забезпечити значне зменшення габаритів фотометричної кулі і, відповідно, витрат на виготовлення та експлуатацію установки для визначення коефіцієнта розсіювання таких об'єктів без збільшення похибки визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів.

Новий метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів та виробів базується на порівнянні освітленостей в фокальній площині об'єктива виробу при освітленні його входного отвору джерелом випромінювання при двох положеннях джерела випромінювання відносно входного отвору об'єктива, тобто при двох значеннях кутового розміру α вихідного отвору джерела випромінювання з центра входного отвору об'єктива виробу. Кутовий розмір

α змінюється завдяки зміні відстані L між вихідним отвором джерела випромінювання та вхідним отвором об'єктива виробу від найбільшого α_{\max} , що не більше 180° , до найменшого α_{\min} , що не менше $30'$. Вихідний отвір джерела випромінювання має бути не менше ніж на 10% більший за вхідний отвір об'єктива виробу і повинен мати рівномірну яскравість в межах кутової апертури, що не менше кутового розміру α_{\max} . Освітленості вимірюють, як і в стандартизованому методі, фотоелектричним способом. Коефіцієнт розсіювання C об'єктива виробу за новим методом – це відношення різниці освітленості в фокальній площині об'єктива виробу $E_1 - E_2$ до освітленості E_1 [243]:

$$C = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1}, \quad (6.40)$$

де E_1 - освітленість в фокальній площині об'єктива виробу при освітленні його вхідного отвору джерелом випромінювання, що має кутовий розмір $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$ на відстані $L_{\max} \geq L \geq L_{\min}$ відповідно; E_2 - освітленість в фокальній площині об'єктива виробу при освітленні його вхідного отвору джерелом випромінювання, що має кутовий розмір α_{\min} на відстані L_{\max} .

При мінімальній відстані $L_{\min} = 0$ ($\alpha = \alpha_{\max}$) в фокальній площині об'єктива створюється освітленість E_1 з найбільшим вкладом розсіяних оптичними елементами та елементами конструкції об'єктива променів (рис. 6.10,а), а при максимальній відстані L_{\max} ($\alpha = \alpha_{\min}$) - освітленість E_2 з найменшим вкладом розсіяних променів (рис. 6.10,б) [240].

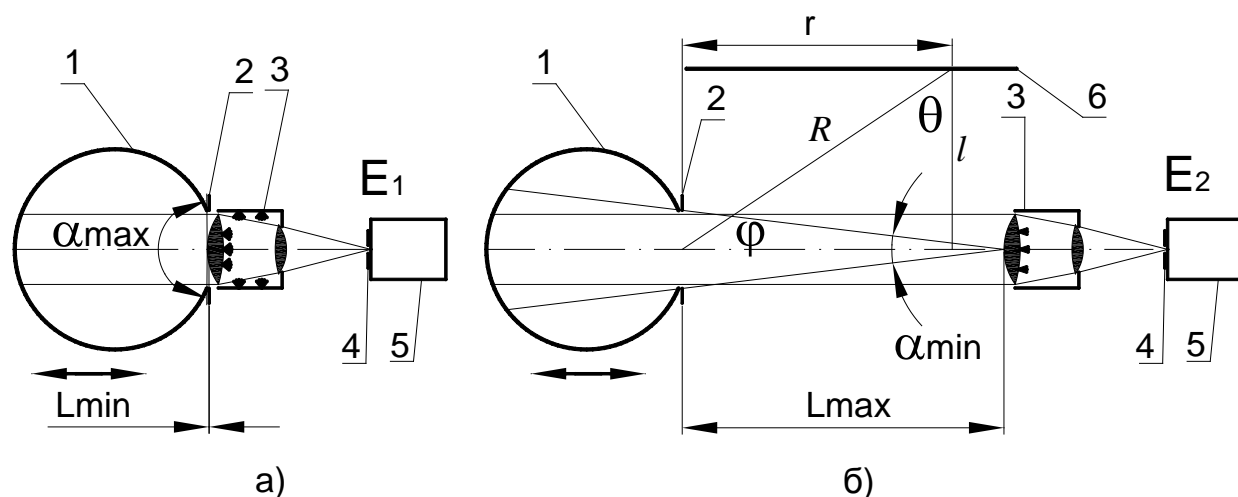


Рис. 6.10. Схеми розташування елементів установки для визначення коефіцієнта розсіювання об'єтивів за новим методом при вимірюванні значень E_1 та E_2 : 1 – фотометрична куля; 2 – діафрагма кулі; 3 – об'єтив, що контролюється; 4 – діафрагма фотоприймача; 5 – фотоприймач; 6 – захисна завіса.

При цьому значення L_{\max} має визначатись за формулою:

$$L_{\max} \geq \frac{D_{\text{отв}}}{2 \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{\min}}{2} \right)}, \quad (6.41)$$

де $D_{\text{отв}}$ – діаметр вихідного отвору джерела випромінювання (отвору діафрагми фотометричної кулі); α_{\min} – найменший кутовий розмір вихідного отвору джерела випромінювання з центру вхідного отвору об'єктива виробу.

Кутовий розмір α_{\min} , як і кутовий розмір чорного предмета в стандартизованій установці [236–238], повинен бути не менше $30'$ і не більше 2° для всіх об'єтивів, кут поля зору яких 4° і більше, та не більше половини кута поля зору об'єктива виробу для об'єтивів з меншим кутом поля зору. Таким чином, $L_{\max} \geq 29D_{\text{отв}}$ і при великих $D_{\text{отв}}$ відстань L_{\max} буде досить значною.

Діаметр діафрагми фотоприймача розраховується за формулою, що подібна формулі для розрахунку розміру зображення чорного предмета стандартизованої установки [238]:

$$d_{\phi.л} \leq 0,7 \cdot 2f' \frac{D_{омс} - D}{2L_{max}} = 0,7 \left(1 - \frac{D}{D_{омс}} \right) 2f' \lg \left(\frac{\alpha_{min}}{2} \right), \quad (6.42)$$

де D та f' – діаметр вхідного отвору та задня фокусна відстань об'єктива виробу.

Вкладом розсіяних променів при відстані L_{max} можна знехтувати, так як він значно менший від похибки вимірювання. Так при дифузному характері розсіювання променів на елементах розсіювання, які знаходяться на поверхні та всередині оптичних і на поверхні конструктивних елементів об'єктива вклад розсіяних променів прямо пропорційно залежить від тілесного кута Ω вхідного отвору об'єктива виробу, який при його зменшенні теж зменшується. При зміні L від L_{min} до L_{max} (α від α_{max} до α_{min}) тілесний кут Ω значно зменшується, так як залежить від α , і спричинює відповідне зменшення вкладу розсіяних променів. Тілесний кут Ω розраховується за формулою $\Omega = 2\pi (1 - \cos \alpha/2)$ [241] і при $\alpha_{max} = 180^\circ$ $\Omega_{max} = 2\pi$, а при $\alpha_{min} = 2^\circ$ $\Omega_{min} = 0,0003\pi$, тобто зменшується в 6666 разів. Якщо найбільший вклад розсіяних променів при $L_{min} = 0$ обчислюється навіть кількома десятками відсотків, то при L_{max} вклад розсіяних променів буде не більше 0,01%, що значно менше за можливу похибку вимірювання (не більше 10% в стандартизованій установці).

На точність вимірювання коефіцієнта розсіювання впливає і яскравість поверхонь, що знаходяться в межах тілесного кута Ω_{max} та поза межами тілесного кута Ω_{min} при відстані $L = L_{max}$, тобто поверхонь стін, стелі, підлоги та предметів, що освітлюються вихідним отвором фотометричної кулі, або поверхонь захисних екранів чи завіс, якщо вони використовуються. Яскравість цих поверхонь – це яскравість темного фону, на якому знаходиться світлий вихідний отвір джерела випромінювання. Для зменшення їх яскравості значення їх коефіцієнтів відбиття повинні бути малими, а відстані до них від вихідного отвору джерела випромінювання -

достатньо великими. Якщо ці поверхні є дифузно відбиваючі, то їх яскравість L в залежності від їх освітленості E визначається виразом [245]:

$$L = \frac{\rho E}{\pi}, \quad (6.43)$$

де ρ – коефіцієнт відбиття поверхні.

Освітленість E , яку створює вихідний отвір джерела випромінювання, що має яскравість L_0 та площу S , на невеликій ділянці поверхні, що знаходиться від нього на відстані R , визначається виразом [241]:

$$E = L_0 \frac{S \cos \phi}{R^2} \cos \theta, \quad (6.44)$$

де ϕ – кут між перпендикуляром до площини вихідного отвору джерела випромінювання та напрямком від його центру до центра згаданої ділянки поверхні; θ – гострий кут між тим же напрямком та перпендикуляром до поверхні цієї ділянки.

Максимальний вплив яскравості L на вимірювання коефіцієнту розсіювання буде, коли кути ϕ і θ будуть кутами прямокутного трикутника з гіпотенузою R (рис. 6.10,б):

$$\cos \phi = \frac{r}{R}, \quad \cos \theta = \frac{l}{R}, \quad R^2 = r^2 + l^2, \quad (6.45)$$

де r – прилеглий до кута ϕ катет прямокутного трикутника; l – прилеглий до кута θ катет прямокутного трикутника.

Після виконання необхідних перетворень маємо:

$$L = \frac{\rho L_0 S}{\pi} \frac{r \cdot l}{(r^2 + l^2)^2}. \quad (6.46)$$

При круглому вихідному отворі джерела випромінювання $S = \pi D_{\text{отв}}^2 / 4$ і формула (6.46) матиме вигляд:

$$L = \frac{\rho L_0 D_{\text{отв}}^2}{4} \frac{r \cdot l}{(r^2 + l^2)^2}. \quad (6.47)$$

При зміні r яскравість L буде найбільшою при $r = l/\sqrt{3}$, коли $\phi=60^\circ$ і $\theta=30^\circ$:

$$L_{\max} = \frac{3\sqrt{3}D_{\text{отв}}^2}{64} \frac{\rho L_0}{l^2}. \quad (6.48)$$

При найбільшому отворі $D_{\text{отв}}=1,5$ м $L_{\max} = 0,183 B_0 \rho / l^2$ і для того, щоб, наприклад, $L_{\max} = 0,01 L_0$ потрібно забезпечити $\rho / l^2 \leq 0,055$, чого легко добитись шляхом вибору необхідних значень l і ρ , а враховуючи що можливі значення $\rho \geq 0,03$ потрібно, щоб значення $l \geq 0,75$ м.

Після визначення величин l і ρ значення яскравість L залежить тільки від r . При $r = 0$ яскравість дорівнює нулю, а при збільшенні r яскравість L збільшується до максимального значення L_{\max} , а потім зменшується і при великих значеннях r знову наближається до нуля. В табл. 6.1, як приклад, наведені результати розрахунку значень відношення L/L_0 для різних відстаней r при $D_{\text{отв}}=1,5$ м, $\rho = 0,055$ і $l = 1$ м, та їх середніх значень для інтервалу r від 0 до 6 м.

Таблиця 6.1

Параметри установки, що наведена на рис. 6.10

r , м	B/B_0	$(B/B_0)_{\text{ср}}$	r , м	B/B_0	$(B/B_0)_{\text{ср}}$
0	0	-	7,0	0,00009	0,00203
0,3	0,0078	0,0039	8,0	0,00006	0,00184
0,6	0,01	0,0059	9,0	0,00004	0,00166
0,9	0,0085	0,0066	10	0,00003	0,00151
1,2	0,0062	0,0065	11	0,00002	0,00139
1,5	0,0044	0,0062	12	0,000018	0,00128
1,8	0,0031	0,0057	13	0,000014	0,00119
2,1	0,0022	0,0053	14	0,000011	0,00111
2,4	0,0016	0,0049	15	0,000009	0,00104
2,7	0,0012	0,0045	16	0,000007	0,00098
3,0	0,00093	0,0042	17	0,000006	0,00093
3,3	0,00072	0,0039	18	0,000005	0,00088
3,6	0,00057	0,0036	19	0,000004	0,00083
3,9	0,00046	0,0034	20	0,000004	0,00079
4,2	0,00037	0,0032	21	0,000003	0,00076

4,5	0,00031	0,0030	25	0,000002	0,00066
4,8	0,00026	0,0029	30	0,000001	0,00057
5,1	0,00022	0,0027	35	0,0000007	0,00050
5,4	0,00018	0,0026	40	0,0000005	0,00044
5,7	0,00016	0,0025	45	0,0000003	0,00040
6,0	0,00014	0,00235			

З табл. 6.1 видно, що при $L_{\max} = 0,01L_0$ максимальне значення $(L/L_0)_{\text{ср}} = 0,0066$, тобто максимальне значення $(L/L_0)_{\text{ср}} = 0,66(B_{\max}/B_0)$, а при $r = 25$ м значення $(L/L_0)_{\text{ср}} = 0,00066$, тобто зменшується в 10 разів. Таким чином, при $r = L_{\max} = 29D_{\text{омв}}$ навіть при великих значеннях $D_{\text{омв}}$ відношення $(L/L_0)_{\text{ср}}$ буде таким малим, що не буде впливати на похибку вимірювання коефіцієнта розсіювання, тобто ним можна знехтувати. При зменшенні значень $D_{\text{омв}}$ відношення $(L/L_0)_{\text{ср}}$ буде зменшуватись за рахунок зменшення значення L .

Якщо визначити коефіцієнти розсіювання об'єктива для різних значень кутового розміру α , змінюючи α шляхом зміни відстані L від L_{\min} до L_{\max} з кроком ΔL , і побудувати графік залежності коефіцієнта розсіювання C від L або від α , то можна визначити по ньому кількість розсіюючих елементів конструкції об'єктива, порядок їх розташування вздовж головної осі об'єктива та вклад кожного з них в коефіцієнт розсіювання об'єктива. При цьому на малих відстанях L значення $(L/L_0)_{\text{ср}}$ може бути таким, що зможе вплинути на похибку вимірювання коефіцієнта розсіювання. Тому для цього випадку потрібно вибирати такі значення l і ρ , щоб значення яскравості L при малих відстанях L не могло суттєво збільшити цю похибку.

Новий метод не потребує використання коліаторного об'єктива і імітатора чорного предмету [243]. Таким чином, усунено обмеження на діаметр вхідного отвору об'єктива виробу по відношенню до внутрішнього діаметра фотометричної кулі, яке вимагається в стандартах [236–238] шляхом обмежень на відносний отвір коліаторного об'єктива. Ця обставина дозволяє зменшити внутрішній діаметр фотометричної кулі до 5 разів

відносно діючих стандартів (з $5,5D$ до $1,1D$) [244]. Так по стандартизованому методу світловий діаметр коліматорного об'єктива має бути не менше $1,1D$, його відносний отвір - не більше $1:5$. Тому його фокусна відстань повинна бути не менше $5,5D$, а внутрішній діаметр фотометричної кулі повинен дорівнювати фокусній відстані, тобто теж має бути не менше $5,5D$. По новому методу вихідний отвір джерела випромінювання, в якості якого можна використати фотометричну кулю, має бути не менше $1,1D$ і повинен мати рівномірну яскравість в межах кутової апертури, що не менше кутового розміру α_{\max} (для дистанційного зондування Землі з космосу $\alpha_{\max} \leq 140^\circ$). Таким чином, при умові забезпечення необхідної рівномірності яскравості не шляхом збільшення діаметра фотометричної кулі, а іншими методами, її внутрішній діаметр може бути близький до діаметра її вихідного отвору, тобто може бути майже рівним йому ($1,1D$) так як відсутні будь-які інші обмеження. В цьому випадку в якості джерела випромінювання може використовуватись і напівкуля. Так при $D = 1500$ мм внутрішній діаметр напівкулі може бути $1,1D = 1650$ мм, а не $5,5D = 8250$ мм для внутрішнього діаметра фотометричної кулі по діючим стандартам.

Схема установки для реалізації нового методу наведена на рис. 6.11 [249]. Поворотний важіль має можливість повертатися навколо вертикальної і горизонтальної осей в межах кутів поля зору об'єктива. Поперечна горизонтальна направляюча та тримач фотоелектричного приймача забезпечують можливість переміщення приймача в горизонтальному та в вертикальному напрямках в межах лінійного поля зображення об'єктива виробу та вздовж поворотного важеля. Тримач фотоелектричного приймача забезпечує також можливість поворотів фотоелектричного приймача навколо вертикальної і горизонтальної осей. Все це забезпечує можливість проводити контроль в довільній точці поля зору об'єктива, а також дає змогу контролювати позаосьові об'єктиви та об'єктиви з ламаною оптичною віссю, конструкція корпусу яких є несиметричною. Відстань між діафрагмою отвору кулі та вхідним отвором виробу можна змінювати вздовж довільного

головного променя об'єктива виробу від L_{\min} до L_{\max} . При цьому центр діафрагми фотоелектричного приймача встановлюється в довільну точку лінійного поля зображення об'єктива виробу. Відносна похибка визначення коефіцієнта розсіювання знаходиться в межах $\pm 5\%$ при значенні C не більше 0,3 і можливе подальше її зменшення до $\pm 1\%$.

Так відносна похибка визначення коефіцієнту розсіювання згідно з діючими стандартами:

$$\gamma_1 = \pm 1,1 \cdot \sqrt{(3,6 \cdot 1)^2 + (1,5)^2 + (4,5)^2 + (2)^2 + (5)^2 + (5)^2} = \pm 10,4\% , \quad (6.49)$$

де 1,1 – коефіцієнт при довірчій ймовірності $P=0,95$ [242]; 3,6 – коефіцієнт похибки світлового потоку лампи порівняно з похибкою її напруги живлення [246]; 1 – похибка напруги живлення ламп, %, [238]; 1,5 – клас вимірювального приладу, %, [238,247]; 4,5 – найбільша відносна похибка вимірювального приладу при кратності його шкал 3 ($3 \cdot 1,5=4,5$), %; 2 – межа відхилень від лінійності системи фотоелектричний приймач - вимірювальний прилад, % [238]; 5 – межа відносної похибки атестації в метрологічному центрі коефіцієнту розсіювання коліматорного об'єктиву, %; 5 – межа відносної похибки, що викликана яскравістю чорного предмету ($0,001 \cdot 100\% / 0,02 = 5\%$, де 0,02 нижня межа інтервалу значень коефіцієнтів розсіювання об'єктів виробів).

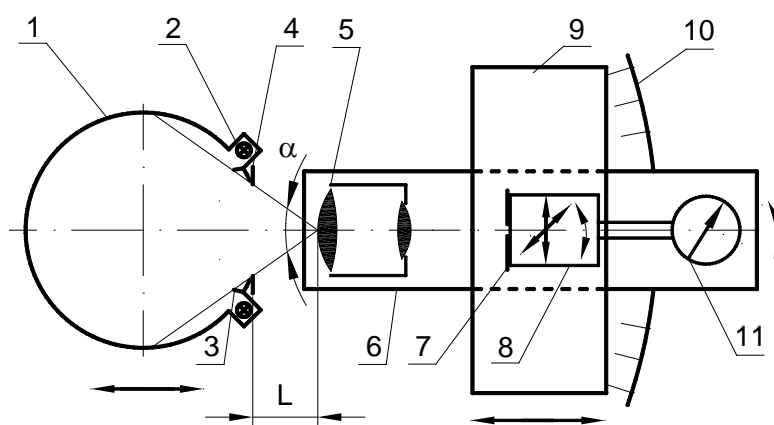


Рис. 6.11. Схема установки для вимірювання коефіцієнта розсіювання об'єктів за новим методом: 1 – фотометрична куля; 2 – джерело світла;

3 – заслінки; 4 – діафрагма кулі; 5 – об’єктив, що контролюється;
 6 – поворотний важіль; 7 – діафрагма фотоприймача; 8 – фотоприймач;
 9 – направляюча переміщення фотоприймача; 10 – горизонтальний лімб
 поворотного пристрою (вертикальний лімб не показано); 11 – вимірювальний
 прилад

Аналогічно відносна похибка визначення коефіцієнта розсіювання за новим методом:

$$\gamma_2 = \pm 1,1 \cdot \sqrt{(3,6 \cdot 1)^2 + (1,5)^2 + (1,5 \cdot 1 / (1 - 0,3))^2 + 0,94^2} = \pm 5\% , \quad (6.50)$$

де 1,1 – коефіцієнт при довірчій ймовірності $P = 0,95$ [245]; 3,6 – коефіцієнт похибки світлового потоку лампи порівняно з похибкою її напруги живлення [246]; 1 – похибка напруги живлення ламп, %, [238]; 1,5 – клас вимірювального приладу, %, [238,247]; $1/(1 - 0,3)$ - нижня межа динамічного діапазону показань вимірювального приладу при верхній межі коефіцієнтів розсіювання об’єктів 0,3 відн. од., причому відхилення від лінійності системи фотоелектричний приймач - вимірювальний прилад в цьому діапазоні нехтовно мале, так як легко забезпечити знаходження фотоструму фотоелектричного приймача в межах лінійної частини його енергетичної характеристики; 0,94 – межа відносної похибки, яка викликана найбільшою яскравістю темного фону $L_{max} = 0,01L_0$, на якому знаходиться світловий вихідний отвір джерела випромінювання при $(L/L_0)_{cp} = 0,0066$, тобто при $r = 0,9$ м $(0,0066 \cdot 100\% \cdot 1/(1-0,3)=0,94\%)$.

Порівнюючи межі відносних похибок, які викликані яскравостями чорного предмету і темного фону (відносно яскравості фотометричної кулі), відзначимо, що похибка від яскравості темного фону в 5,3 раз менша. При цьому максимальна яскравість темного фону в 10 разів більша, ніж яскравість чорного предмету в стандартизованій установці, тому забезпечити потрібну яскравість темного фону значно легше, ніж добитись необхідного значення яскравості чорного предмету.

Якщо забезпечити живлення ламп стабілізованою напругою з похибкою стабілізації в межах $\pm 0,1\%$, вимірювати фотострум фотоприймача вимірювальним приладом класу не нижче 0,5, а найбільшу яскравість темного фону забезпечити не більше 0,005 яскравості внутрішньої поверхні фотометричної кулі - $(L/L_0)_{\text{cp}} = 0,0033$, то відносна похибка вимірювання коефіцієнта розсіювання зменшиться ще більше:

$$\gamma = \pm 1,1 \cdot \sqrt{\frac{(3,6 \cdot 0,1)^2 + (0,5)^2 + (0,5 \cdot 1 / (1 - 0,3))^2}{+(0,0033 \cdot 100 \cdot 1 / (1 - 0,3))^2}} = \pm 1,16\% \approx \pm 1\%. \quad (6.51)$$

Для розширення функціональних можливостей контролю до складу установки було введено нові елементи. Запропоновано між об'єктивом, що контролюється, та діафрагмою фотоелектричного приймача, концентрично з нею, вставляти додаткову діафрагму або непрозорий екран, яка (який) може виводитись за межі променів, які розповсюджуються від об'єктиву до діафрагми фотоелектричного приймача [248]. Додаткова діафрагма (екран) повинна мати такий діаметр отвору, щоб відношення цього діаметра до відстані між фокальною площиною об'єктива і додатковою діафрагмою було рівним відносному отвору об'єктива.

Додаткова діафрагма може виконуватись рухомою з можливістю її переміщення вздовж заднього фокального відрізка об'єктива на таку відстань від діафрагми фотоелектричного приймача, на якій відношення діаметра отвору додаткової діафрагми до відстані між нею і фокальною площиною об'єктива буде рівним відносному отвору об'єктива. При цьому повинна бути забезпечена можливість виведення додаткової діафрагми за межі променів, які розповсюджуються від об'єктива до діафрагми фотоелектричного приймача, на краях інтервалу переміщення. Схема установки з додатковою діафрагмою наведена на рис. 6.12.

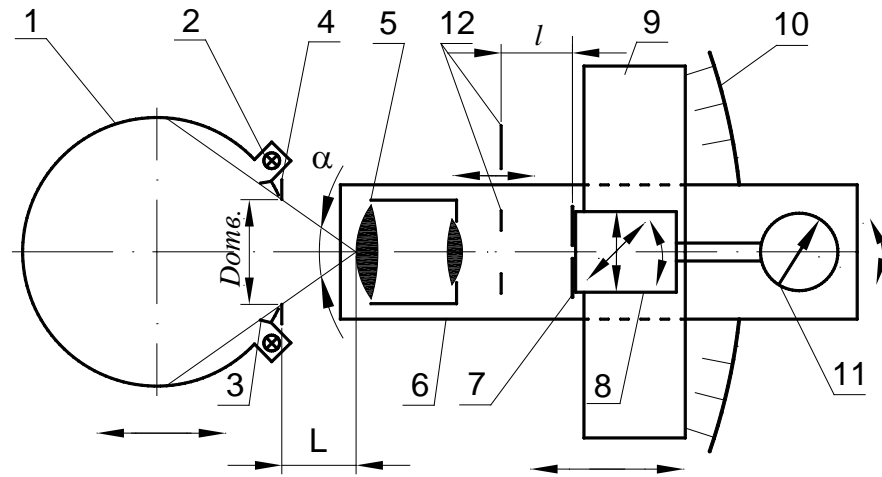


Рис. 6.12. Схема установки з додатковою діафрагмою (екраном) 12

Введення до складу установки додаткової діафрагми або непрозорого екрану дозволяє визначати як значення коефіцієнта розсіювання C , так і його складові C_1 , C_2 і C_3 (див. рис 6.13 та рис. 6.14) за формулами [250]:

- при використанні діафрагми (рис. 6.13):

$$\begin{aligned}
 C &= C_1 + C_2 + C_3 = \frac{E'_3}{E'_2} + \frac{E'_4 - E'_3}{E'_2} + \frac{(E'_2 - E'_1) - (E'_4 - E'_3)}{E'_2} = \\
 &= \frac{E'_3 + (E'_2 - E'_1)}{E'_2} = \frac{E'_3}{E'_2} + \left(1 - \frac{E'_1}{E'_2}\right).
 \end{aligned}
 \tag{6.52}$$

Причому $C_1 = \frac{E'_1 - E'_3}{E'_2}$, $C_1 + C_2 = \frac{E'_2 - E'_4}{E'_2} = 1 - \frac{E'_4}{E'_2}$,

$$C_2 + C_3 = 1 - \frac{E'_1}{E'_2},$$

де: C_1 та C_2 – складові, що створюється променями, які знаходяться за межами кутової апертури об'єктиву, при $L = L_{\max}$ та її приріст при зміні L від L_{\max} до L_{\min} відповідно;

C_3 – приріст складової, що створюється променями, які знаходяться в межах кутової апертури об'єктиву, при зміні L від L_{\max} до L_{\min} , причому на відстанях $L_{\max} \geq 29D_{\text{отв.}}$ він нехтовно малий;

E'_1, E'_2, E'_3, E'_4 – освітленості, які створюються об'єктивом в його фокальній площині при $L=L_{\max}, L=L_{\min}$ і виведеній діафрагмі (E'_1, E'_2) та при $L=L_{\max}, L=L_{\min}$ і введеній діафрагмі (E'_3, E'_4);

- при використанні екрану (рис. 6.14):

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 + C_3 = \frac{E'_3}{E'_2} + \frac{E'_4 - E'_3}{E'_2} + \frac{(E'_2 - E'_1) - (E'_4 - E'_3)}{E'_2} = \\ &= \frac{E'_3 + (E'_2 - E'_1)}{E'_2} = \frac{E'_3}{E'_2} + \left(1 - \frac{E'_1}{E'_2}\right). \end{aligned} \quad (6.53)$$

$$\text{Причому } C_1 = \frac{E'_3}{E'_2}, C_1 + C_2 = \frac{E'_4}{E'_2}, C_2 + C_3 = 1 - \frac{E'_1}{E'_2},$$

де: E'_1, E'_2, E'_3, E'_4 – освітленості, які створюються об'єктивом в його фокальній площині при $L=L_{\max}, L=L_{\min}$ і виведеному екрані (E'_1, E'_2) та при $L=L_{\max}, L=L_{\min}$ і введеному екрані (E'_3, E'_4).

Використання додаткової діафрагми або непрозорого екрану дозволяє отримувати залежність від кутового розміру джерела випромінювання α не тільки коефіцієнта розсіювання C , а також і його складових C_1, C_2 і C_3 . Слід звернути увагу на те, що значення $C_1 + C_2$ не залежить від значення L_{\max} , а значення C_3 залежить від L_{\max} і зменшується при зменшенні L_{\max} . Відповідно буде зменшуватись і розраховане значення коефіцієнта розсіювання C , тобто буде збільшуватись похибка його вимірювання, так як до похибок розрахованого значення коефіцієнта розсіювання C добавиться похибка, значення якої дорівнює значенню зміни складової C_3 при зміні відстані L від $L_{\max} \geq 29D_{\text{отв.}}$ до L'_{\max} . Припустимо, що відстань $L'_{\max} = 2,9D_{\text{отв.}}$, тобто в 10 разів менша за L_{\max} [249]. При зміні відстані L від $L'_{\max} = 2,9D_{\text{отв.}}$ до $L_{\min} = 0$, що відповідає зміні кутового розміру джерела випромінювання від $\alpha = 20^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ та тілесного кута опромінення вхідного отвору об'єктива, що контролюється, від $\Omega = 2\pi[1 - \cos(\alpha/2)] = 2\pi(1 - \cos 10^\circ) = 0,096$ ср до $\Omega = 2\pi = 6,28$ ср

відповідно [241], швидкість зміни складової C_3 в залежності від зміни Ω дорівнює $C_3/\Delta\Omega=0,075/(6,28-0,096)=0,012$ відн. од./ср. Так як складова C_3 змінюється пропорційно зміні Ω , то при зміні відстані L від $L_{\max}=29D_{\text{отв.}}$ до $L'_{\max}=2,9D_{\text{отв.}}$ і зміні відповідно Ω від 0,00096 ср до 0,096 ср, тобто на 0,095 ср, складова C_3 зміниться на $0,012 \cdot 0,095 = 0,00114$ відн. од., тобто на $0,00114 \cdot 100\% / 0,3 = 0,38\%$. При цьому допустима зміна складової C_3 в $3,3/0,38 = 8,7$ разів більша.

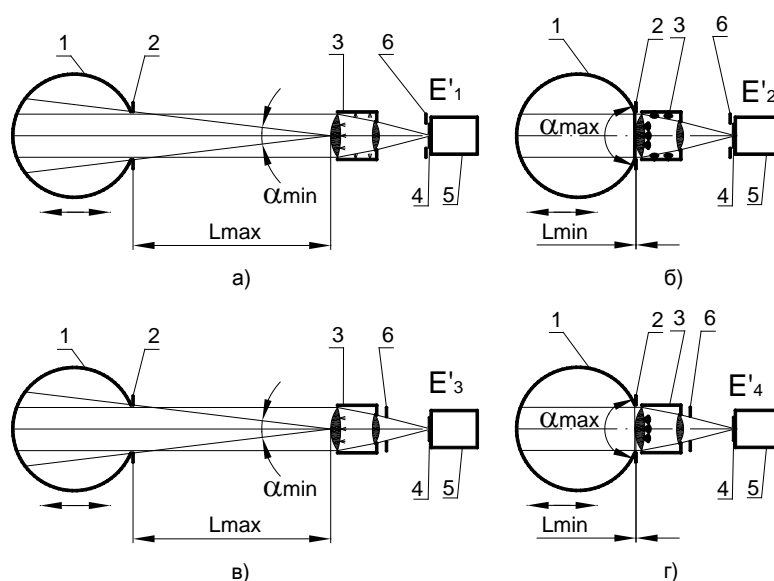


Рис. 6.13. Вимірювання коефіцієнта розсіювання з додатковою діафрагмою

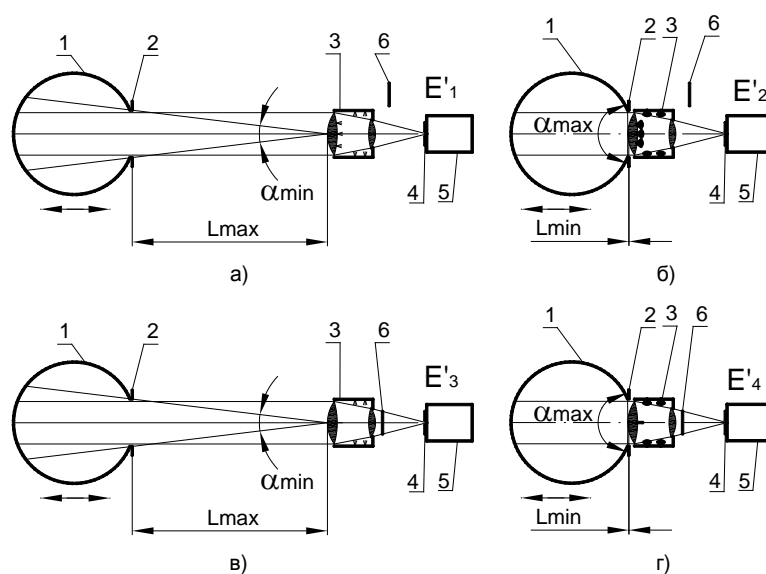


Рис. 6.14. Вимірювання коефіцієнта розсіювання з додатковим екраном

Якщо додаткова діафрагма (екран) може рухатись вздовж заднього фокального відрізка об'єктива, що контролюється, то її (його) переміщують з заданим кроком від початкового місця її знаходження (біля діафрагми фотоелектричного приймача), до місця, в якому відношення її діаметра до відстані між фокальною площиною об'єктива і нею дорівнює відносному отвору об'єктива та на кілька кроків далі. На кожному кроці реєструють значення E'_4 та відстань l від діафрагми фотоелектричного приймача. Будують графік залежності E'_{4i} від l . По графіку визначають кількість розсіювальних конструктивних елементів об'єктива, порядок їх розташування вздовж оптичної осі об'єктива та відносні значення їх коефіцієнтів розсіювання відносно один одного.

Якщо вивести діафрагму (екран) за межі променів, які розповсюджуються від об'єктива до діафрагми фотоелектричного приймача та зареєструвати значення E'_2 , то значення сум складових $(C_1+C_2)_i$ коефіцієнта розсіювання C можна розрахувати за формулами:

- при використанні діафрагми

$$(C_1 + C_2)_i = 1 - \frac{E'_{4i}}{E'_2}; \quad (6.54)$$

- при використанні екрану

$$(C_1 + C_2)_i = \frac{E'_{4i}}{E'_2}. \quad (6.55)$$

Якщо побудувати графік залежності сум складових $(C_1+C_2)_i$ від l_i , то можна визначити значення коефіцієнтів розсіювання кожного з розсіювальних конструктивних елементів об'єктива, що контролюється.

Якщо значення l_i перерахувати в значення діючого кута поля зору β_i фотоелектричного приймача

$$\beta_i = 2 \arctg \left(\frac{d_{\text{ДД}}}{2l_i} \right), \quad (6.56)$$

де $d_{\text{ДД}}$ – внутрішній діаметр додаткової діафрагми (діаметр екрану), то графік потрібно будувати у вигляді залежності сум складових $(C_1+C_2)_i$ від β_i .

В реальних оптичних системах контраст зображення зменшується із-за дифракційних явищ, наявності аберацій оптичної системи, попадання на зображення стороннього світла, яке є частиною всього світлового потоку, що пройшов оптичну систему, але не приймає участі в побудові зображення предмета. Джерелами стороннього світла в оптичній системі є самі оптичні поверхні завдяки частковому відбиванню від них світла навіть при умові їх старанного просвітлення, а також виколки, подряпини, пазури, звиліни, сліди очистки, погано зафарбовані края лінз, бокові грані призм і внутрішні поверхні механічних оправ об'єктива із-за відбивання або відхилення ними променів світла від заданого розрахункового ходу. Таким чином, кожна освітленість E'_1, E'_2, E'_3, E'_4 складається з кількох складових.

При використанні діафрагми (рис. 6.13):

$$\begin{aligned} E'_1 &= E_A + E_{O\min} + E_{M\min}; & E'_2 &= E_A + E_{O\max} + E_{M\max}; \\ E'_3 &= E_A + E_{O\min}; & E'_4 &= E_A + E_{O\max}, \end{aligned} \quad (6.57)$$

де: E_A – освітленість, яка створюється об'єктивом в його фокальній площині променями, що знаходяться в межах його робочої апертури і не змінили заданого розрахункового ходу;

$E_{O\max}$ і $E_{O\min}$ – освітленості, які створюються в фокальній площині об'єктива променями, що знаходяться в межах його робочої апертури і були розсіяні оптичними елементами, при $L=L_{\min}$ та $L=L_{\max}$ відповідно;

$E_{M\max}$ і $E_{M\min}$ – освітленості, які створюються в фокальній площині об'єктива променями, що знаходяться за межами його робочої апертури і були розсіяні елементами конструкції, при $L=L_{\min}$ та $L=L_{\max}$ відповідно.

При використанні екрану (рис. 6.14):

$$\begin{aligned} E'_1 &= E_A + E_{O\min} + E_{M\min}; & E'_2 &= E_A + E_{O\max} + E_{M\max}; \\ E'_3 &= E_{M\min}; & E'_4 &= E_{M\max}. \end{aligned} \quad (6.58)$$

Тоді для реальних оптичних систем значення коефіцієнта розсіювання C і його складових C_1 , C_2 і C_3 як при використанні діафрагми так і при використанні екрану будуть визначатись за одними і тими самими формулами:

$$\begin{aligned} C = C_1 + C_2 + C_3 &= \frac{E_{M \min}}{E_A + E_{O \max} + E_{M \max}} + \frac{E_{M \max} - E_{M \min}}{E_A + E_{O \max} + E_{M \max}} + \\ &+ \frac{E_{O \max} - E_{O \min}}{E_A + E_{O \max} + E_{M \max}} = \frac{E_{M \max} + E_{O \max} - E_{O \min}}{E_A + E_{O \max} + E_{M \max}} = \\ &= \frac{E_{M \min}}{E_A + E_{O \max} + E_{M \max}} + \left(\frac{E_{M \max} - E_{M \min} + E_{O \max} - E_{O \min}}{E_A + E_{O \max} + E_{M \max}} \right). \end{aligned} \quad (6.59)$$

$$\text{Причому} \quad C_1 = \frac{E_{M \min}}{E_A + E_{O \max} + E_{M \max}},$$

$$C_1 + C_2 = \frac{E_{M \max}}{E_A + E_{O \max} + E_{M \max}},$$

$$C_2 + C_3 = \frac{E_{M \max} - E_{M \min} + E_{O \max} - E_{O \min}}{E_A + E_{O \max} + E_{M \max}}.$$

Ці формули відображають фізичну природу коефіцієнта розсіювання C та його складових C_1 , C_2 і C_3 і не залежать від фізичної природи цих складових та від методів і засобів їх вимірювання. При розгляді останніх формул стає очевидним те, що сума $C_1 + C_2 = C_M$ – є складовою коефіцієнта розсіювання C , яка викликана розсіюванням світла на поверхні внутрішніх механічних оправ об'єктива. Складова $C_3 = C_O$ коефіцієнта розсіювання C , яка викликана розсіюванням світла, що виникає при проходженні світлового потоку через оптичні елементи об'єктива при $L = L_{\min}$, зменшена відносно її значення при $L = L_{\max}$. При цьому, знаючи освітленості E'_1 , E'_2 , E'_3 , E'_4 , можна легко розрахувати значення C , C_M і C_O за формулами [250]:

- при використанні діафрагми

$$C = \frac{E'_2 - E'_3}{E'_2}, \quad C_M = \frac{E'_2 - E'_4}{E'_2} = 1 - \frac{E'_4}{E'_2}, \quad C_O = \frac{E'_4 - E'_3}{E'_2}; \quad (6.60)$$

- при використанні екрану

$$C = \frac{E'_3 + (E'_2 - E'_1)}{E'_2}, \quad C_M = \frac{E'_4}{E'_2}, \quad C_O = \frac{(E'_2 - E'_1) - (E'_4 - E'_3)}{E'_2}. \quad (6.61)$$

Отже при використанні діафрагми (екрану) вперше з'являється можливість розділити коефіцієнт розсіювання C об'єктива на складову, яка викликана розсіюванням світла на елементах конструкції об'єктива, і на складову, яка викликана розсіюванням світла, що виникає при проходженні світлового потоку через оптичні елементи об'єктива. Запропонований метод має дуже важливе значення для контролю якості дослідних (експериментальних) об'єктивів при їх розробці та для контролю якості об'єктивів в процесі їх виробництва.

Розглянемо метод оцінки точності вимірювання світлорозсіювання об'єктивів за новим методом.

Для визначення можливості вимірювання коефіцієнта розсіювання новим методом були проведені експериментальні роботи по вимірюванню двох об'єктивів різними методами [250].

В табл. 6.2 наведені результати вимірювання коефіцієнта розсіювання в центрі поля зору двох об'єктивів (YASHICA JAPAN – $D: f'=1:4,5, f'=230$ мм та Телеар-5 $D:f' = 1:5,6$ і $1:11, f' = 250$ мм) на установці з додатковою діафрагмою (непрозорим екраном) в порівнянні з результатами вимірювання коефіцієнта розсіювання цих об'єктивів в центрі поля зору на стандартизованій установці. Вимірювання проводились з введенням і виведенням додаткової діафрагми або екрану в двох спектральних діапазонах при $L_{\max} = 240$ мм на установці з діаметром фотометричної кулі $D_k = 600$ мм, діаметром її вихідного отвору $D_{\text{отв}} = 83$ мм, діаметром коліматорного об'єктива $D_{\text{к.о.}} = 60$ мм.

Таблиця 6.2

Результати вимірювання коефіцієнта розсіювання об'єктів

Параметри об'єктива		Спектральний діапазон, мкм	Діафрагма або екран	Установка									Відносне відхилення %
				з додатковою діафрагмою (непрозорим екраном)								стандарт изована	
$D: f'$	f' , мм			Покази вимірювального приладу пропорційні E'_1, E'_2, E'_3, E'_4				Коефіцієнт розсіювання та його складові, %					
				N_1	N_2	N_3	N_4	C_1	C_2	C_3	C	C	
1:4,5	230	0,4...0,8	д	685	691	650	654	5,1	0,29	0,58	5,9	6,8	-13
1:4,5	230	0,4...0,8	е	679	685	32	34	4,7	0,29	0,58	5,6	6,8	-18
1:4,5	230	0,4...1,2	д	547	559	516	525	5,5	0,54	1,6	7,7	9,0	-14
1:5,6	250	0,4...1,2	д	287	304	233	248	17,8	0,66	4,9	23,4	20,8	13
1:11	250	0,4...1,2	д	101	107	76	80	23,4	1,87	3,7	29	26,8	8,2

При використанні додаткової діафрагми (екрану) значення відносного відхилення результатів вимірювань двома методами становило $\pm 18\%$, що при відносній похибці вимірювання кожним із методів $\pm 10\%$ менше границь допустимого відхилення ($\pm 20\%$). При цьому значення відносного відхилення результатів вимірювань при використанні додаткової діафрагми становило $\pm 14\%$, а значення відносного відхилення результату вимірювань при використанні екрану - 18% .

В табл. 6.3 наведені результати розрахунків відносного впливу на коефіцієнт розсіювання C його складової частини C_3 на основі їх значень, що приведені в табл. 6.2.

Таблиця 6.3

Вплив складової C_3 на коефіцієнт розсіювання C об'єктива

Параметри об'єктива		Спектральний діапазон, мкм	Діафрагма або екран	Коефіцієнт розсіювання і його складова, %		Відносний вплив, % (C_3/C)·100
$D:f'$	f' , мм			C_3	C	
1:4,5	230	0,4...0,8	д	0,58	5,9	9,8
1:4,5	230	0,4...0,8	е	0,58	5,6	10,4
1:4,5	230	0,4...1,2	д	1,6	7,7	20,8
1:5,6	250	0,4...1,2	д	4,9	23,4	20,9
1:11	250	0,4...1,2	д	3,7	29	12,8

Відносний вплив коефіцієнта C_3 на коефіцієнт розсіювання C змінюється в досить широких межах (9,8...21)%, що не дозволяє знехтувати складовою C_3 , так як її відносне значення може бути більше від відносної похибки вимірювання коефіцієнта розсіювання C або рівне їй.

На рис. 6.15 наведена залежність освітленості E'_4 від положення екрану l для об'єктива $D:f'=1:4$ і $f'=210$ мм при використанні екрану. Ця залежність була отримана для спектрального діапазону 0,4...0,8 мкм, діаметра діафрагми фотоелектричного приймача 1,6 мм, діаметра екрану 2 мм (1), 5 мм (2) та 10 мм (3). Відношення діаметра екрану до відстані l між фокальною площиною об'єктива і екраном дорівнює відносному отвору об'єктива в другій точці перелому, коли l приймає значення 8 мм (1), 20 мм (2) і 40 мм (3) - $2:8 = 1:4$, $5:20 = 1:4$ і $10:40 = 1:4$, тобто дорівнює відносному отвору об'єктива. Значення N в другій точці перелому однакове для всіх трьох залежностей, тобто не залежить від діаметра екрану, що використовується при вимірюваннях. З цього випливає, що визначений на основі цих значень N коефіцієнт розсіювання об'єктива від нього не залежить. Так як точок перелому дві, то об'єктив має один розсіювальний

конструктивний елемент, від якого розсіяні промені поширюються за межами вихідної апертури об'єктива.

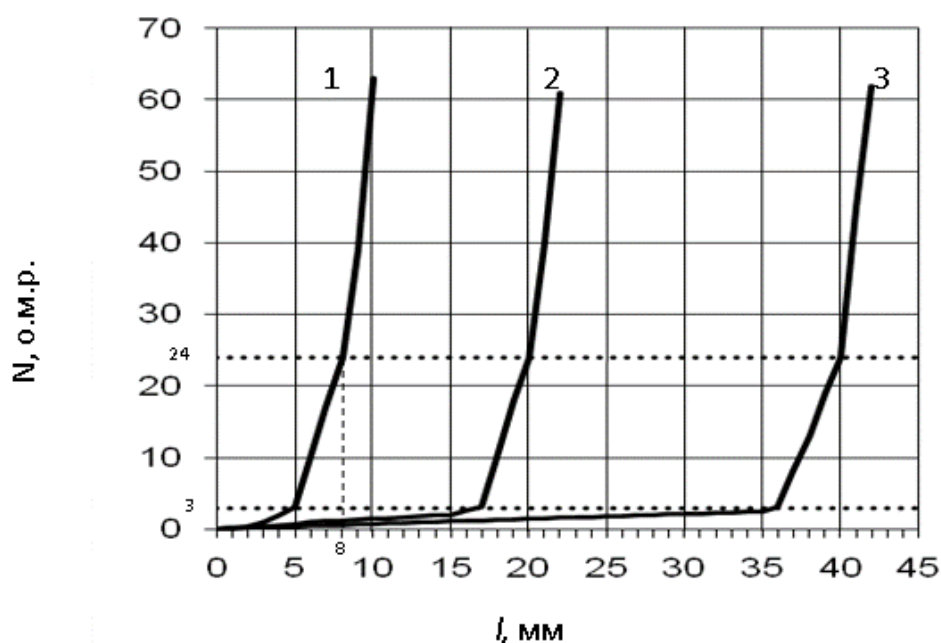


Рис. 6.15. Залежність освітленості E'_4 від положення екрана l

На рис. 6.16 наведена залежність для освітленості E'_4 від положення екрана l об'єктива YASHICA JAPAN ($D: f'=1:4,5$, $f'=230$ мм) при використанні додаткової діафрагми (1) чи екрану (2). Спектральний діапазон 0,4...0,8 мкм, діаметр діафрагми фотоелектричного приймача 0,5 мм, діаметр додаткової діафрагми 5 мм, діаметр екрану 5 мм. На цьому рисунку також наведена залежність, яка одержана при діаметрі діафрагми фотоелектричного приймача 0,03 мм, діаметрі додаткової діафрагми 5 мм, спектральному діапазоні 0,4...1,2 мкм і при збільшеній в 10 разів чутливості вимірювального приладу. Відношення діаметра діафрагми (екрану) до відстані l між фокальною площиною об'єктива і діафрагмою (екраном) дорівнює відносному отвору об'єктива в другій точці перелому, коли l приймає значення 23 мм ($5:23 \approx 1:4,5$) і не змінюється при зміні діаметра діафрагми фотоелектричного приймача. Так як точок перелому дві, то об'єктив має один розсіювальний конструктивний елемент, від якого розсіяні промені поширюються за межами вихідної апертури об'єктива.

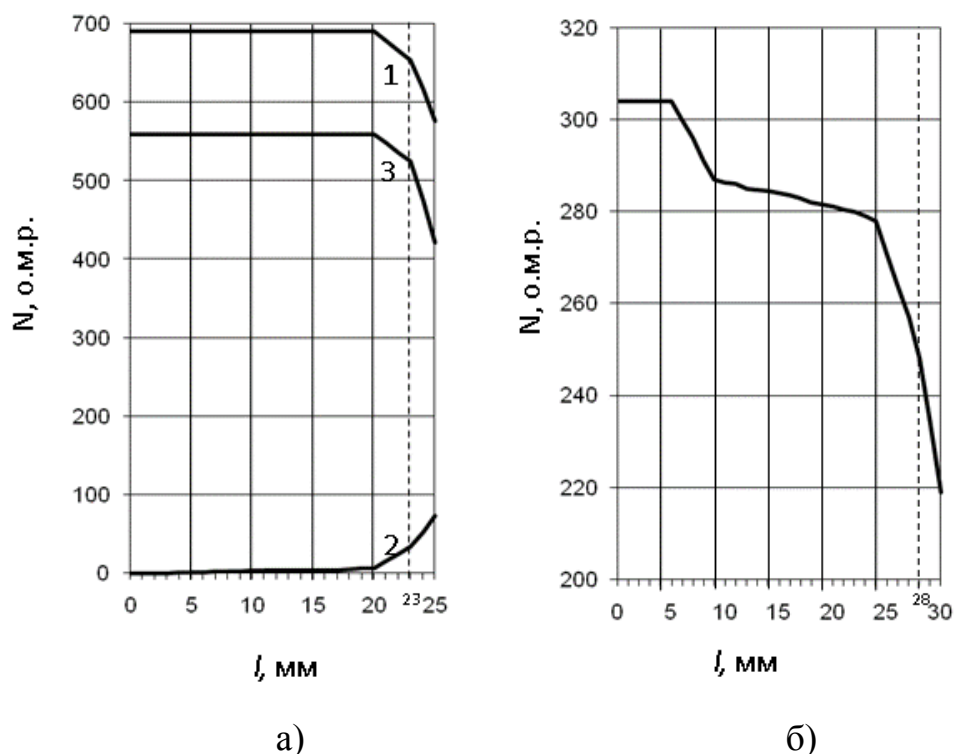


Рис. 6.16. Залежність освітленості E'_4 від положення екрану l :

а – об'єktiv YASHICA JAPAN ($D : f' = 1:4,5$; $f' = 230$ мм);

б – об'єktiv Телеар-5 ($D : f' = 1:5,6$; $f' = 250$ мм)

На рис. 6.16,б наведена залежність для об'єктива Телеар-5 ($D : f' = 1:5,6$; $f' = 250$ мм) при використанні додаткової діафрагми. Спектральний діапазон 0,4...1,2 мкм, діаметр діафрагми фотоелектричного приймача 0,03 мм, діаметр додаткової діафрагми 5 мм. Відношення діаметра діафрагми до відстані l між фокальною площиною об'єктива і діафрагмою дорівнює відносному отвору об'єктива в четвертій точці перелому, коли l приймає значення 28 мм ($5:28 = 1:5,6$). Так як точок перелому чотири, то об'єktiv має три розсіювальних конструктивних елементи, від яких розсіяні промені поширюються за межами вихідної апертури об'єктива. Це і є причиною того, що у нього коефіцієнт розсіювання в 3 рази більший, ніж у об'єктива YASHICA JAPAN (у відповідності з табл. 6/3 $23,4/7,7=3$). Значення тангенса кута нахилу відрізка ломаної лінії пропорційно значенню коефіцієнта розсіювання конкретного конструктивного елементу, а

положення відрізка відносно других відрізків та початку координат дозволяє ідентифікувати цей розсіювальний конструктивний елемент об'єктива, що конче потрібно при розробці та відпрацюванні нових високоякісних об'єктивів, а також при їх виготовленні. Так в об'єктиві Телеар-5 з трьох розсіювальних конструктивних елементів найбільший коефіцієнт розсіювання має третій конструктивний елемент, а найменший – другий, якщо відлік вести вздовж оптичної осі об'єктива в напрямку до його вхідного отвору.

6.4 Оптимізація конструкції полегшення дзеркал з урахуванням впливу сили тяжіння на деформацію дзеркал

Зі збільшенням просторової роздільної здатності росте і апертура дзеркал телескопа. Це приводить до значного зростання ваги і ціни створення такого телескопа. Крім того, до дзеркальних поверхонь дзеркал пред'являють дуже високі вимоги щодо можливої деформації від розрахованого профілю в наслідок дії експлуатаційних факторів. І якщо в космосі основним дестабілізаційним фактором є температурний градієнт, то при виводі на орбіту треба зважати на вібрацію та удари. Що стосується контролю дзеркал та ОЕС ДЗЗ в цілому на Землі в лабораторії, то тут більше всього впливає на деформацію дзеркальної поверхні сила тяжіння, ось якої, як правило розташована в горизонті. Тому задача полегшення дзеркал - це зменшення маси дзеркал за рахунок конструктивних вибірок при забезпеченні достатніх жорсткості та міцності, що необхідні при виготовленні, при проведенні контрольних операцій та при виведенні системи на орбіту [251].

Ступень полегшення конструкції дзеркала можна виразити через коефіцієнт полегшення [252]

$$K_3^o = \frac{M_C - M_o}{M_C}, \quad (6.62)$$

де M_C – маса «суцільного» дзеркала, M_o – маса «полегшеного» дзеркала.

До початку конструювання дзеркала з полегшенням потрібно вибрати матеріал, з якого буде виготовлено дзеркало. До матеріалів для великогабаритних дзеркал пред'являються наступні вимоги, обумовлені жорсткими допусками на відповідність поверхні дзеркала розрахунковій формі і збереження цієї форми в часі:

- висока опірність зовнішнім впливам (комбінація фізичних властивостей, що забезпечує малі механічні й температурні деформації: модуль пружності, модуль зрушення, коефіцієнт температурного розширення);
- стабільність властивостей і розмірів у часі;
- висока якість полірованої поверхні, що забезпечує досить високий коефіцієнт відбиття дзеркального покриття;
- мала щільність.

Основними матеріалами, що застосовують для космічних дзеркал є ситал СО-115, церодур фірми SCHOTT, карбід кремнію та берилій [253,254].

Матеріалів для астрономічних дзеркал, що повністю відповідають усім перерахованим вимогам, поки немає. Берилій має високий коефіцієнт температурного розширення і токсичність, карбід кремнію має добрі механічні властивості, але його щільність в півтора рази вище, ніж у кераміки. Тому внаслідок таких властивостей як висока ізотропність, стабільність, здатність до оптичної обробки, найбільш доступна ціна і найголовніше коефіцієнт термічного розширення близький до нуля склокераміка ситал та церодур є найкращими матеріалами для виготовлення заготовок для великогабаритних дзеркал. Недоліками цих матеріалів є низька теплопровідність, мала механічна міцність і порівняно висока щільність.

Існують три класичні схеми полегшення дзеркал [255,256]:

- 1) Дзеркала зі спеціально розрахованою формою задньої поверхні дзеркала (рис. 6.17,а);
- 2) Дзеркала «сандвічі», які спікаються з трьох окремо виготовлених частин (рис. 6.17,б);

3) Дзеркала, в яких с задньої сторони зроблені конструктивні вибірки для полегшення (рис. 6.17,в).

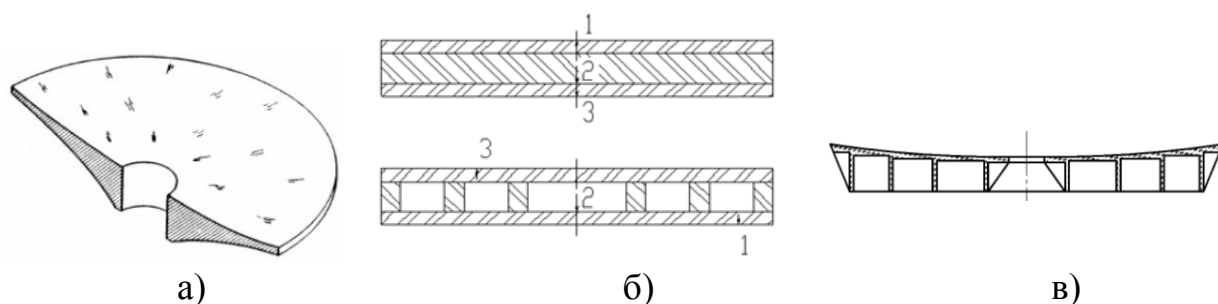


Рис. 6.17. Варіанти полегшення дзеркал [256]

Перший варіант полегшення дзеркал має найменший коефіцієнт полегшення. Другий володіє високою жорсткістю та добрим коефіцієнтом полегшення, але потребує для свого втілення устаткування та технології для електроадгезійного способу з'єднання великогабаритних дзеркал. Третій найбільш простий у виготовленні, має високий коефіцієнт полегшення, але потребує точного розрахунку форм та розмірів вибірок для забезпечення необхідної жорсткості дзеркала.

Після вибору варіанта полегшення дзеркала проводиться оптимізація його геометричних розмірів для отримання максимальної жорсткості конструкції при її мінімальній вазі [257]. Основним критерієм, за яким вибирається найкращий варіант полегшення, є деформація робочої дзеркальної поверхні, яка характеризується середньоквадратичним відхилення. Воно повинно бути при виготовленні, контролі та при експлуатації на орбіті в межах $RMS \leq 0,01 \div 0,03\lambda$ в залежності від оптичної системи [258]. Важливим при оптимізації полегшення є форма (шестикутники, чотирикутники, трикутники, круглі) та розміри вибірок, які в залежності від форми дзеркал можуть бути різними [259].

Структурний аналіз конструкції полегшення дзеркала проводиться за допомогою однієї із програм, які дозволяють робити аналіз конструкції методом кінцевих елементів. До таких програм відносяться SolidWorks,

ANSYS, NASTRAN, OOFELIE та інші, які розраховують зміщення точок сітки кінцевих елементів конструкції під впливом сили тяжіння, навантаження, вібрації, впливу температури та інших факторів. За допомогою цих програм можна розрахувати деформацію не тільки окремого дзеркала, а і правильно сконструювати елементи конструкції кріплення для мінімізації їх впливу на деформації дзеркала.

Однак суттєвим недоліком для аналізу оптико-механічних систем такими програмами є те, що вони не дозволяють аналізувати вплив деформацій на оптичні характеристики, такі як МПФ. Крім того, вони не розділяють зміщення або нахил поверхні від відхилення самої поверхні от номінальної форми. Для стикування даних по деформації, які були отримані при структурному аналізі по цим програмам, з програмами аналізу оптичних систем існує декілька спеціальних програм, наприклад SigFst. Саме тому була розроблена власна програма, що дозволяє переводити деформацію робочої поверхні оптичних елементів під впливом різних факторів з програми ANSYS в програму ZEMAX [260].

Для автоматизації процедури аналізу поверхневих деформацій, викликаних механічними і термічними факторами, була розроблена спеціальна комп'ютерна програма Deform [261]. Вона дає можливість визначити числові параметри (форму, орієнтацію та положення у просторі) деформованої поверхні та зміну показника заломлення у матеріалі деталі, викликаного градієнтом розподілів об'ємних температури та навантаження. Ці результати можуть бути експортовані в сучасне програмне забезпечення розрахунку оптики для подальшого аналізу якості отриманого зображення. У даній роботі був застосований класичний алгоритм Диференційної Еволюції [262].

Залишкові деформації вищих порядків апроксимують поверхнею, яка представлена класичними поліномами Цернике (рис.6.18,а). Таким чином, коефіцієнти розкладу деформації поверхні, які характеризують постійну складову, нахил по осям X і Y , а також дефокусування, можуть бути легко

виключені з подальшого аналізу незалежно один від одного, так як такі деформації у реальних системах можуть бути усунуті юстуванням (рис. 6.18, б).

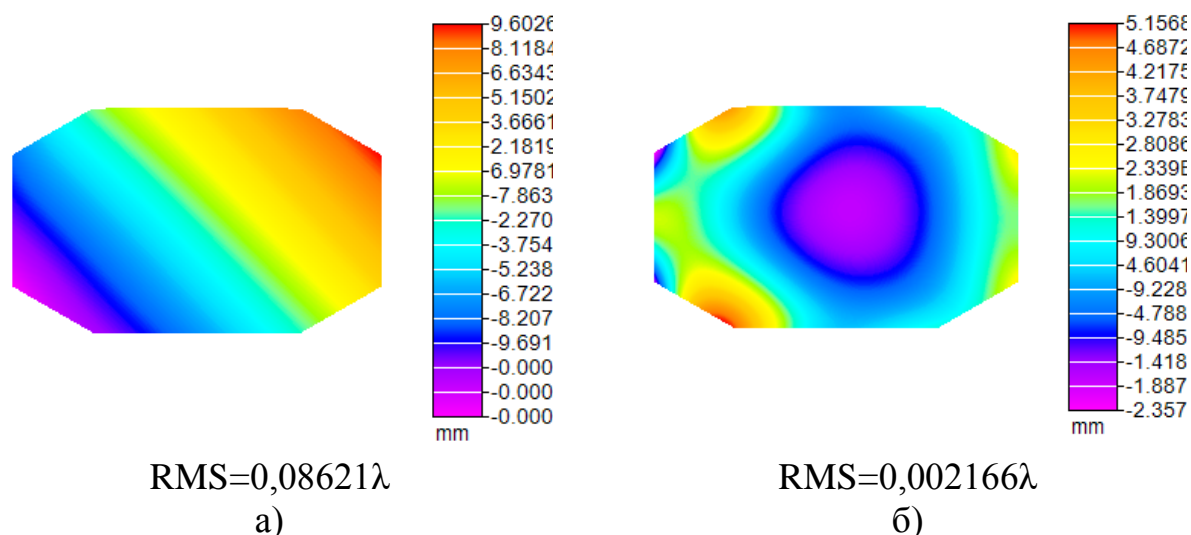


Рис. 6.18. Приклад розрахунку деформації високого порядку робочої поверхні дзеркала, на яку діє механічна сила (форма поверхні визначається набором заданих точок поверхні): а – усі коефіцієнти Церніке, б – перші чотири коефіцієнта вилучені із розрахунку

Остаточний звіт містить інформацію про знайдені параметри оптимізації, які визначають геометрію і просторову орієнтацію обраної базової поверхні, чисельні параметри залишкових деформацій вищого порядку, а також коефіцієнти розкладу поліномів Церніке (всього 36 коефіцієнтів для семи порядків). Значення стандартного відхилення (RMS) та висоти нерівності (PTV) для поверхні, що описується поліномами високого порядку, оцінюються перед та після апроксимації.

Для апроксимації змін у склі, що виникають в результаті дії температурних або механічних факторів, в програмі ZEMAX може бути застосована поверхня «Gradient 4». Для кожного вузла сітки, використовуючи значення температури або напруження, оцінюється показник заломлення матеріалу в залежності від матеріалу, що використовується.

За допомогою програм ANSYS та Deform було проведено оптимізацію великогабаритного вісесиметричного дзеркала для сканера надвисокої роздільної здатності. Найбільш оптимальним варіантом полегшення такого дзеркала є шестикутні отвори в задній стінці дзеркала з кріпленням дзеркала на три отвори в задній частині дзеркала. Коефіцієнт полегшення такого дзеркала сягає 75%, а деформація робочої поверхні в 10 разів менше, ніж у дзеркала без полегшення [263].

Найкращим кріпленням для позаосьових дзеркал є кріплення на три шарніра. Воно забезпечує температурну розв'язку та не створює додаткових деформацій на дзеркалі [264].

6.5 Експериментальні дослідження тепловізійної камери космічного базування з мікроболометричною матрицею

Експериментальне перевірка розробленої фізичної моделі інфрачервоного спектро радіометра виконувалась шляхом одержання серії тестових інфрачервоних зображень з різними параметрами (робочими спектральними діапазонами, температурами, складом оптичних мір, тощо) з наступною їх обробкою і оцінюванням основних характеристик тепловізора (просторового розділення, мінімальної роздільної різниці температур, калібрувальних коефіцієнтів та точності відтворення фізичних характеристик – температури і коефіцієнта теплового випромінювання).

6.5.1 Стенд для дослідження тепловізійної камери

Для проведення експериментів було розроблено та виготовлено випробувальний стенд фізичної моделі інфрачервоного спектро радіометра з підвищенням просторового розділення за допомогою субпіксельної обробки зображень (рис. 6.19), складовими якого є: 1) пристрій формування теплових полів; 2) дзеркальний коліматор; 3) фізична модель ІЧ-спектро радіометру; 4) блок інтерференційних світлофільтрів; 5) електронний блок формування зображення; 6) персональний комп'ютер; 7) монітор; 8) прецизійний столик з

мікроподачами по трьом осям [265].

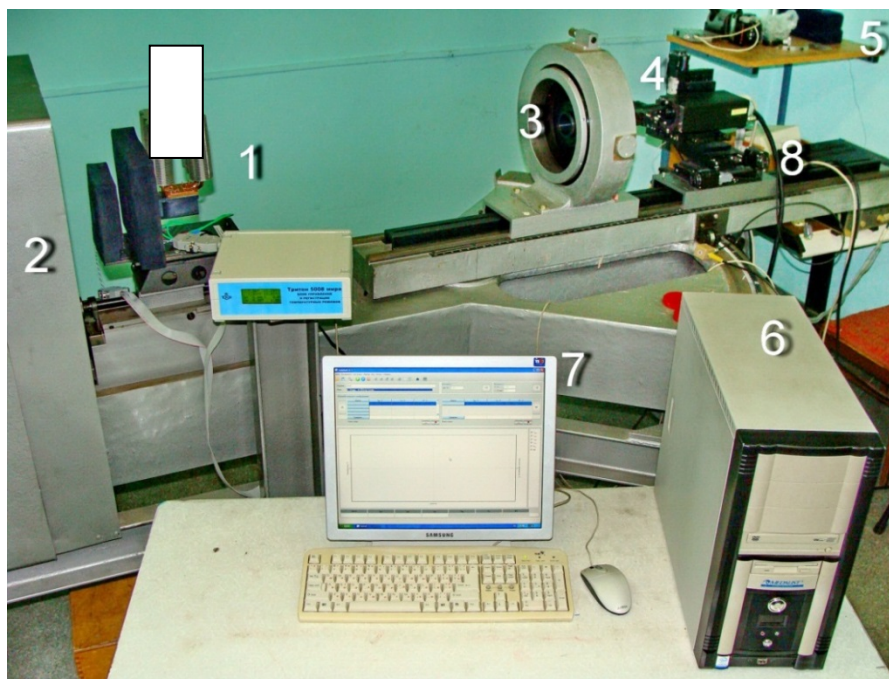


Рис. 6.19. Стенд фізичної моделі інфрачервоного спектро радіометра з підвищеним просторовим розділенням за допомогою субпіксельної обробки зображень [265]

Принцип роботи стенда полягає в формуванні зображення тест-об'єкта в площині аналізу приймача випромінювання. В якості тест-об'єкта для вимірювання *MRTD* застосовують міри Фуко, які мають чорну поверхню, що випромінює з температурою, яка дорівнює температурі навколишнього повітря. Безпосередньо за мірою розташовано фоновий випромінювач у вигляді пластини з міді із чорною поверхнею, що випромінює з температурою, яка може змінюватися за допомогою чотирьох елементів Пелтьє в більшу або меншу сторону відносно температури навколишнього повітря. На фоновій пластині та мірах розташовані температурні датчики, які з'єднані з електронним блоком формування різниці температур, за допомогою якого задається необхідний температурний контраст ΔT між фоном та мірою. Керування електронним блоком та контроль температури ведеться за допомогою спеціального програмного забезпечення через персональний комп'ютер. Похибка вимірювання різниці температур ΔT

складає 0,05 °C.

Теплові міри Фуко розташовані в фокальній площині позаосьового параболічного дзеркального коліматора з фокусною відстанню $f' = 3011$ мм. Дзеркальний коліматор на вхідній зіниці ІЧ-об'єктива формує зображення теплових мір в нескінченності.

Просторова частота мір була підібрана таким чином, щоб контролювати просторові частоти, як нижчі за частоту Найквіста матричного приймача випромінювання, так і вищі за неї [266].

Фізична модель спектрорадіометра складалася з декількох складових частин.

За дзеркальним коліматором був установлений інфрачервоний об'єктив, якість зображення якого досліджувалася. В якості об'єктива для експерименту використовувався об'єктив з наступними параметрами:

- фокусна відстань – 102,7 мм;
- відносний отвір – 1:1,37;
- робочій спектральний діапазон – $\Delta\lambda = 8 \dots 14$ мкм;
- поле зору – $2\omega = 11^\circ$;
- коефіцієнт передачі контрасту на частоті Найквіста – не менше чим 0,42.

ІЧ об'єктив створював зображення теплових мір Фуко в своїй фокальній площині, в якій була розташована площа фоточутливих елементів фотоприймального пристрою – ІЧ камери Tau 320 47320001X-SPNLX з болометричною матрицею 320×256 пікселів розміром 25×25 мкм. Температурна чутливість ІЧ камери, яка, зазвичай, виражається еквівалентній шуму різниці температур *NETD* (noise equivalent temperature difference) дорівнює $NETD = 0,05$ К.

Фотоприймальний блок кріпиться до прецизійного трьохкоординатного столика фірми Standa, який може переміщати фотоприймальний блок по трьом осям з шагом 1 мкм. Це дозволяє точно центрувати болометричну матрицю відносно зображення теплових мір, а також, встановлювати площину

фоточутливих елементів фотоприймального блоку в площину зображення ІЧ-об'єктиву.

Аналоговий сигнал з фотоприймального пристрою поступав в електронний блок формування зображення, який формував цифрове зображення теплових мір та передавав його в персональний комп'ютер. Отримані цифрові зображення теплових мір спостерігалися на моніторі персонального комп'ютера.

6.5.2 Дослідження MRPT тепловізора при обробці двох зображень з субпіксельним зміщенням

Для вимірювання мінімально роздільної різниці температур (MRPT) спектро радіометра без субпіксельної обробки зображення і за допомогою обробки двох зображень, що зміщенні один відносно одного по двом координатам на визначену частину пікселя, проводилася реєстрація цих зображень при різній різниці температур в кожному з робочих спектральних діапазонів. Вимірювання MRPT спектро радіометра здійснювалися таким чином: спочатку виконувалася інфрачервона зйомка протяжної поверхні при 6 різних температурах з використанням фільтрів відповідного робочого спектрального діапазону; отримані в такий спосіб кадри були використані при застосуванні програми субпіксельній обробки як зображення фону. Далі проводилася зйомка теплових мір з використанням фільтрів кожного робочого спектрального діапазону при різних значеннях різниці температур ΔT без зсуву та із зсувом відносно зображення міри.

Для кожного значення ΔT отримувалося два кадри: кадр без зміщення $\Delta x = \Delta y = 0$ і кадр із зміщенням $\Delta x = \Delta y = 12$ мкм.

Отримані спостерігачами результати по розділенню зображень мір з різною просторовою частотою в спектральному діапазоні $\Delta \lambda = 8,0 \dots 13,5$ мкм. Очікувані теоретичні значення MRPT за формулою (4.39) без застосування субпіксельної обробки та апроксимовані значення MRPT за результатами розділення зображень спостерігачами після субпіксельної обробки зведені до

табл. 6.3 та наведені на рис. 6.20 і 6.21.

Як видно з приведених даних, за рахунок обробки двох зображень, які субпіксельно зміщені один відносно одного на певну частину пікселя по двом осям, відбувається підвищення просторового розділення системи при одному і тому ж температурному контрасті тест-об'єкта. На низьких просторових частотах вплив субпіксельної обробки знижується. Втім, отримані результати вимірювання МРРТ узгоджуються із змодельованими функціями залежності МРРТ від просторової частоти. При цьому спостерігається підвищення розділення на частоті Найквіста приблизно в 1,4 рази при застосуванні субпіксельної реєстрації зображень, яке збільшується з збільшенням просторової частоти [267].

Таблиця 6.3

Мінімальна роздільна різниця температур $MRTD$ (ν_x) об'єктива з мікроболометричною матрицею

$\nu_x, \text{мм}^{-1}$	ν_x / ν_N	$MRTD, \text{K}$			
		без субпіксельної обробки		після субпіксельної обробки двох зображень	
		Теорет.	Експер.	апроксим	Експер.
5,5	$0,27\nu_N$	0,50	0,50	0,49	0,40
8,0	$0,4\nu_N$	0,57	0,60	0,55	0,55
10,9	$0,55\nu_N$	0,70	1,00	0,70	0,80
15,4	$0,77\nu_N$	1,0	1,20	0,80	0,80
27,1	$1,36\nu_N$	3,1	3,00	1,70	1,80
31,9	$1,59\nu_N$	6,0	5,00	2,10	2,00

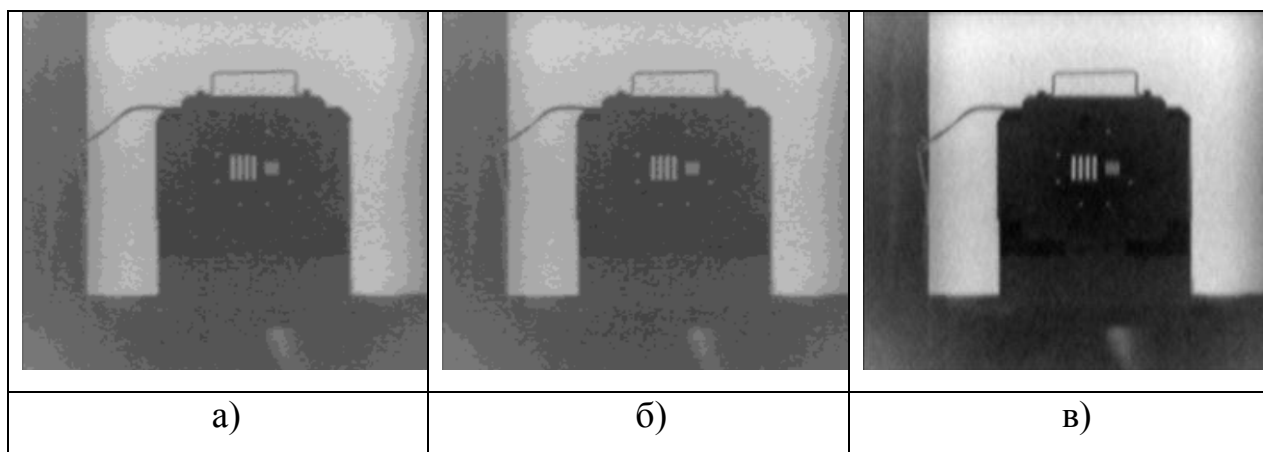


Рис. 6.20. Фотографії мір при експерименті: а і б – два субпіксельно зміщених зображення низького розрізнення;
в – д результат обробки зображень а) та б)

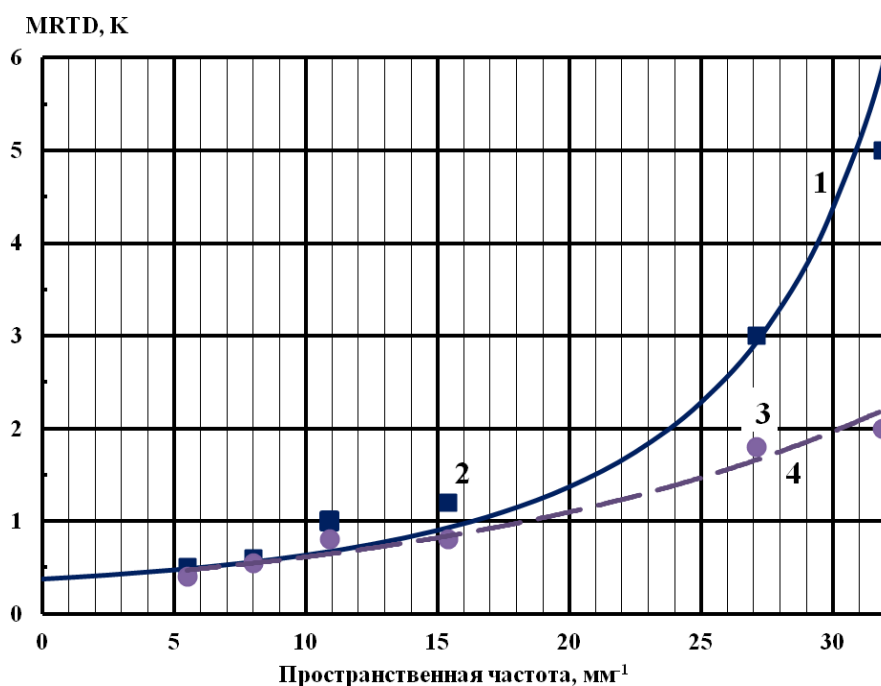


Рис. 6.21. Мінімальна роздільна різниця температур $MRTD$ (ν_x) об'єктива з мікроболометричною матрицею [267]:
1 – без субпіксельної обробки (теоретичні значення);
2 – без субпіксельної обробки (експериментальні значення);
3 – після субпіксельної обробки (експериментальні значення); 4 – апроксимація експериментальних значень після субпіксельної обробки

Таким чином, експериментальні дослідження мінімально роздільної різниці температур інфрачервоного спектро радіометра свідчать про те, що при застосуванні субпіксельної обробки двох кадрів, отриманих субпіксельною реєстрацією в декількох спектральних діапазонах, відбувається підвищення роздільної здатності зображення на очікуваному в результаті математичного моделювання рівні. Застосування зображень фону для певних значень температури є достатнім для обробки і отримання зображень підвищеної роздільної здатності.

6.5.3 Дослідження методу дистанційного вимірювання температури ІЧ камерою

Для проведення досліджень було використано експериментальний стенд, що зображений на рис. 6.19. Зйомка зразків наступних матеріалів з різними значеннями коефіцієнтів теплового випромінювання, температура яких змінювалася в діапазоні 16...33°C з кроком 1...2 °C для з використанням міри з круглим отвором діаметром 10 мм (коефіцієнт теплового випромінювання міри, пофарбованої в чорний колір, близький до 1):

- а) Полірований алюміній ($\epsilon \leq 0,1$);
- б) Відшліфована латунь ($\epsilon = 0,3$);
- в) Необроблений свинець ($\epsilon = 0,4$);
- г) Латунь, окислена при 600°C ($\epsilon = 0,5..0,6$);
- д) Вогнетривка цегла ($\epsilon = 0,65..0,75$);
- е) Листове скло ($\epsilon = 0,85$);
- ж) Папір ($\epsilon = 0,95$).

При використанні фільтрів забезпечувалося перекриття фільтром області міри поза отвором. При отриманні знімків зразків два теплових датчика розміщувалися на фоновому випромінювачі, а третій закріплювався на поверхні зразка. Температура з кожного датчика, а також температура міри, яка відповідала температурі навколишнього середовища, фіксувалися та заносилися до таблиці експерименту.

В Додатку Е приведені таблиці результатів експериментів (таблиця 1–7), де $T_{\text{фв}}$ – температура фонового випромінювача, що задавалася; T_1 і T_2 – температура з датчиків на фонівому випромінювачі; T_3 – температура з датчика на поверхні зразка; $T_{\text{то}}$ – температура тестового об’єкта – міри з круглим отвором.

При дослідженні матеріалу цегли зразок нагрівався до температури 40°C, але в процесі експерименту його температура швидко знижувалася. Тому для кожного з варіантів (1) – (4) було отримано знімки для 1-2 значень температур.

При зйомці зразка листового скла для отримання коректних результатів температура фону за склом має бути нижчою за температуру скла. З цією метою в приміщенні, де проводилися експериментальні дослідження, було підвищено температуру навколишнього середовища (таку ж температуру набула поверхня міри), що дозволило отримати ІЧ знімки матеріалу за двох значень температури. В процесі роботи було виявлено відхилення результатів калібрування для кадрів, зроблених при низьких значеннях температури у випадках (3) та (4).

Відомо, що при роботі зі спектральними фільтрами для отримання коректних результатів їх температура не повинна перевищувати температуру зразків. Для вилучення можливого впливу коефіцієнту теплового випромінювання спектральних фільтрів було здійснено калібрування для випадку (4). При цьому пластини CaF_2 розміщувалися між об’єктивом та приймачем випромінювання (а не між фоновим випромінювачем та мірою).

Для одержання значень констант, необхідних для визначення зональних коефіцієнтів теплового випромінювання за алгоритмом TES, який представлено п. 4.4, на стендовому макеті інфрачервоного спектрорадіометра проведено серію вимірювань інфрачервоних зображень зразків різних матеріалів з різними значеннями коефіцієнтів теплового випромінювання. Вимірювання виконувалися в різних спектральних діапазонах, які задавалися встановленим набором з одного-двох інфрачервоних фільтрів. Криві

спектрального пропускання фільтрів показано на рис. 6.22.

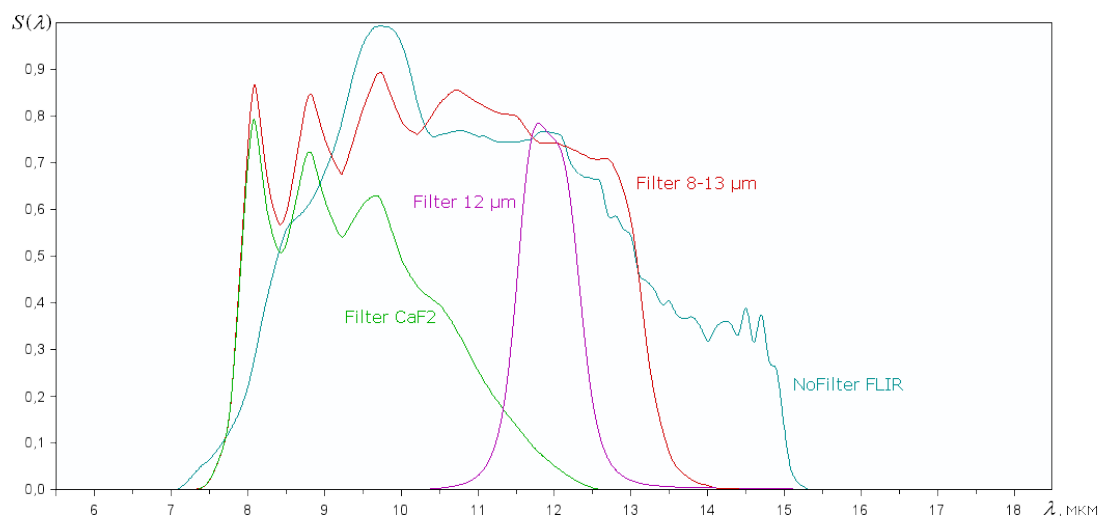


Рис. 6.22. Спектральні чутливості робочих діапазонів макету спектро радіометра

Спектральні коефіцієнти теплового випромінювання тестових зрізків розраховувалися за результатами вимірювання їх коефіцієнтів спектрального відбиття $\rho(\lambda)$ згідно закону Кірхгофа:

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) . \quad (6.63)$$

Результати спектрометричних вимірювань, які приведені до коефіцієнтів теплового випромінювання тестових зразків, ілюструються графіками на рис. 6.23.

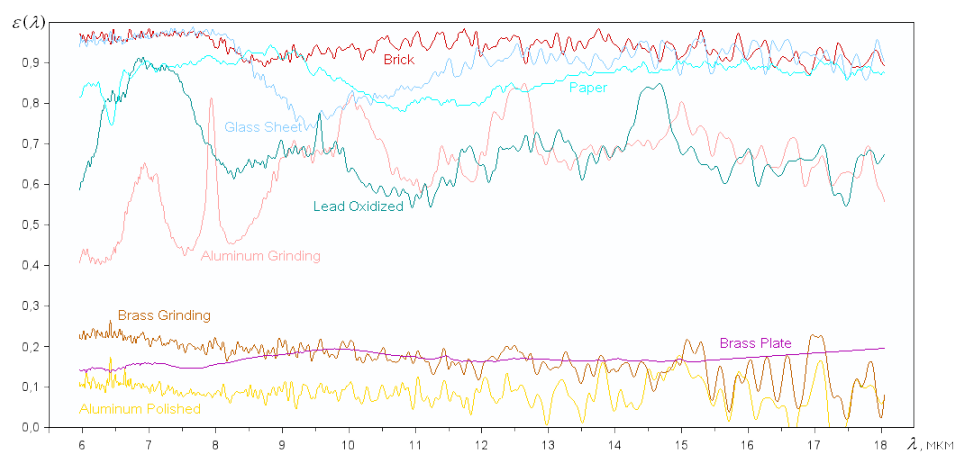


Рис. 6.23. Спектральні коефіцієнти теплового випромінювання тестових зрізків

Зональні коефіцієнти теплового випромінювання розраховувалися згорткою відповідних спектральних коефіцієнтів із спектральною чутливістю робочих спектральних діапазонів. Результати розрахунку зональних коефіцієнтів теплового випромінювання тестових зразків в робочих спектральних діапазонах стендового макета інфрачервоного спектро радіометра зведено до табл. 6.4.

Проведено порівняння розрахованих за результатами спектрометрування тестових зразків коефіцієнтів теплового випромінювання в кожному робочому спектральному діапазоні (табл. 6.4) та визначених за розробленим алгоритмом результатів обробки вимірювань на стендовому макеті інфрачервоного спектро радіометра (табл. 6.5).

Таблиця 6.4

**Результати розрахунків зональних коефіцієнтів теплового
випромінювання за результатами спектральних досліджень тестових
зразків**

Зразок / діапазон	NoFilter- FLIR.dat	Filter- 8- 13.dat	Filter- CaF2.dat	Filter- F12.dat
AluminumGrinding.dat	0,6762	0,6654	0,6361	0,6036
AluminumPolished.dat	0,0856	0,0838	0,0858	0,0928
BrassGrinding.dat	0,1737	0,1784	0,1880	0,1864
BrassPlate.dat	0,3014	0,3014	0,3058	0,2743
Brick.dat	0,9405	0,9402	0,9322	0,9575
Paper.dat	0,8534	0,8516	0,8771	0,8246
GlassSheet.dat	0,8623	0,8622	0,8482	0,9221
LeadOxidized.dat	0,6618	0,6497	0,6528	0,6968

Таблиця 6.5

**Результати визначення коефіцієнтів теплового випромінювання за
результатами експериментальних вимірювань**

Зразок / діапазон	NoFilter- FLIR.dat	Filter-8-13.dat	Filter- CaF2.dat	Filter-F12.dat
AluminumGrinding. dat	0,6585	0,6511	0,6357	0,7128
Brick.dat	0,9259	0,9063	0,8862	0,9474
Paper.dat	0,8552	0,8454	0,8313	0,9018
GlassSheet.dat	0,8734	0,8614	0,8506	0,9184
LeadOxidized.dat	0,6856	0,6758	0,6540	0,7320

Середні значення різниці виміряних і розрахованих за розробленим алгоритмом коефіцієнтів теплового випромінювання в робочих спектральних діапазонах наведені в табл. 6.6.

Таблиця 6.6

**Середні значення різниці виміряних та розрахованих коефіцієнтів
теплового випромінювання**

Спектральний діапазон	NoFilter- FLIR.dat	Filter-8- 13.dat	Filter- CaF2.dat	Filter- F12.dat
Відхилення розрахованих коефіцієнтів теплового випромінювання	0,00088	-0,00582	-0,01772	0,04156

Як витікає з табл. 6.6 величини похибок визначення коефіцієнтів теплового випромінювання суттєво (на порядок) зростають при зменшенні ширини робочих спектральних діапазонів, швидше за все внаслідок погіршення енергетичних показників реєстрації.

Максимально визначені похибки визначення коефіцієнтів теплового випромінювання вкладаються в діапазон від -0,2231 до +0,2216,

середньоквадратичне відхилення дорівнює 0,004725. Внаслідок невизначеності масштабувального множника стендового макета спектрорадіометра при розрахунку температури за алгоритмом TES оцінити абсолютні похибки температури неможливо, але їх середньоквадратичні відхилення лежать в межах від 0,012 К для матеріалів з високим коефіцієнтом теплового випромінювання до 0,272 К для окисдованих металів. Усереднена величина середньоквадратичні відхилення визначення температури за результатами експериментальних вимірювань складає 0,146 К.

6.6 Розрахунок об'єктивів за розробленим методом

Згідно запропонованим в підрозділах 3.1 та 3.2 методам проектування об'єктивів було розраховано декілька варіантів об'єктивів.

В табл. 6.7 наведено конструктивні параметри варіанта 1 об'єктива з наступними характеристиками: фокусна відстань $f'_{ob} = 1000$ мм; відносний отвір 1:3,33; поле зору $\sigma_y = 7^\circ$ і $\sigma_x = \pm 3^\circ$; $d_{cp} = 0,6$; $b = 1,1$, а в таблиці 6.8 наведено значення контрасту K МПФ об'єктива в порівнянні з дифракційною МПФ безабераційного об'єктива і дисторсію цього об'єктива.

Таблиця 6.7

Конструктивні параметри тридзеркального об'єктива з позаосьовим полем зору (варіант 1)

Радіуси R (мм)	Конічна стала – k	Коефіцієнт α_1	Коефіцієнт α_2	Коефіцієнт α_3	Товщина d (мм)
-2116,47	-6,292618	7,8854 E-7	-6,2133 E-11	3,3284 E-17	-571,43
-693,56	0,091613	-	-	-	628,57
-1017,22	0,20421	-	-	-	-707,01

Таблиця 6.8

**Модуляційна передавальна функція і дисторсія
тридзеркального об'єктива (варіант 1)**

Поле зору		К для $\nu=70 \text{ мм}^{-1}$ і $\lambda=0,6328 \text{ мкм}$			Дисторсія
σ_y	σ_x	Діфракц.	Мерід.	Сагіт.	$\Delta\%$
7°	0°	0,80	0,77	0,78	-0,0051
7°	2°	0,80	0,77	0,77	-0,0015
7°	3°	0,80	0,74	0,74	0,0039

В табл. 6.9 наведено конструктивні параметри варіанта 2 об'єктива з наступними характеристиками: фокусна відстань $f'_{ob} = 1000 \text{ мм}$; відносний отвір 1:3,85; поле зору $\sigma_y=7^\circ$ і $\sigma_x=\pm 3^\circ$; $d_{CP} = 0,5916$; $b = 1,186$, а в табл. 6.10 наведено значення контрасту МПФ об'єктива в порівнянні з дифракційною МПФ безабераційного об'єктива і дисторсію цього об'єктива.

Таблиця 6.9

Конструктивні параметри тридзеркального об'єктива (варіант 2)

Радіуси R (мм)	Конічна стала - k	Коефіцієнт α_1	Коефіцієнт α_2	Коефіцієнт α_3	Товщина d (мм)
-2045,69	-1,529564	-	-	-	-541,18
-692,17	-	-	-	-	641,82
-1036,37	0,198298	-	-	-	-716,59

Таблиця 6.10

**Модуляційна передавальна функція і дисторсія
тридзеркального об'єктива (варіант 2)**

Поле зору		К для $\nu=70 \text{ мм}^{-1}$ і $\lambda=0,6328 \text{ мкм}$			Дисторсія $\Delta\%$
σ_y	σ_x	Діфракц.	Мерід.	Сагіт.	
7°	0°	0,78	0,69	0,70	-0,0024
7°	2°	0,78	0,67	0,67	0,0008
7°	3°	0,78	0,61	0,62	0,0057

В табл. 6.11 наведено конструктивні параметри варіанта 3 об'єктива з наступними характеристиками: фокусна відстань $f'_{ob}=2260 \text{ мм}$; відносний отвір 1:10; поле зору $\sigma_y=7^\circ$ і $\sigma_x=\pm 3^\circ$; $d_{CP}=0,2785$; $b=0,975$, а в табл. 6.12 наведено значення контрасту МПФ об'єктива в порівнянні з дифракційною МПФ безабераційного об'єктива і дисторсію цього об'єктива.

Таблиця 6.11

Конструктивні параметри тридзеркального об'єктива (варіант 3)

Радіуси R (мм)	Конічна стала - k	Коефіцієнт α_1	Коефіцієнт α_2	Коефіцієнт α_3	Товщина d (мм)
-2884	-2,772793	-	-	-	-637,27
-1213,4	-2,018507	-	-	-	621,35
-2089	-1	-	-	-	-1578,43

Таблиця 6.12

**Модуляційна передавальна функція і дисторсія
тридзеркального об'єктива (варіант 3)**

Поле зору		К для $\nu=70 \text{ мм}^{-1}$ і $\lambda=0,6328 \text{ мкм}$			Дисторсія $\Delta\%$
σ_y	σ_x	Діфракц.	Мерід.	Сагіт.	
7°	0°	0,44	0,40	0,41	0
7°	2°	0,44	0,41	0,42	0,0005
7°	3°	0,44	0,38	0,39	0,0011

В табл. 6.13 наведено конструктивні параметри варіанта 4 об'єктива з наступними характеристиками: фокусна відстань $f'_{ob} = 1000$ мм; відносний отвір 1:5; поле зору $\sigma_y = 7^\circ$ і $\sigma_x = \pm 3^\circ$; $d_{cp} = 0,4235$; $b = 1,1$, а в табл. 6.14 наведено значення контрасту МПФ об'єктива, в порівнянні з дифракційною МПФ безабераційного об'єктива і дисторсія цього об'єктива.

Таблиця 6.13

Конструктивні параметри тридзеркального об'єктива (варіант 4)

Радіуси R (мм)	Конічна стала - k	Коефіцієнт α_1	Коефіцієнт α_2	Коефіцієнт α_3	Товщина d (мм)
-1571,57	-4,564436	-2,7276 E-6	-8,6515 E-11	5,1285 E-17	-403,05
-590,16	-0,942475	-	-	-	443,35
-944,42	-	-	-	-	-638,48

Таблиця 6.14

**Модуляційна передавальна функція і дисторсія
тридзеркального об'єктива (варіант 4)**

Поле зору		К для $\nu = 70 \text{ мм}^{-1}$ і $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$			Дисторсія $\Delta\%$
σ_y	σ_x	Дифракц.	Мерід.	Сагіт.	
7°	0°	0,71	0,64	0,63	-0,0027
7°	2°	0,71	0,63	0,61	-0,0006
7°	3°	0,71	0,62	0,59	0,0026

В табл. 6.15 зведено результати розрахунків конструктивних параметрів чотирьох варіантів об'єктива за розробленим методом та для порівняння надані дані конструктивних параметрів після незначної оптимізації по програмі ZEMAX, а також надані значення МПФ на частоті Найквіста для трьох полів зору в порівнянні з дифракційною межею та значення дисторсії на краю поля зору.

Таблиця 6.15

Результати розрахунків конструктивних параметрів чотирьох варіантів об'єктива по розробленому методу

Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
	По методиці / після оптимізації			
f'_o , мм	-6000	-6000	-6000	-6000
D_H / D_B , мм	600/170	600/200	600/180	500/160
d_1 , мм	-420	-420	-480	-600
d_2 , мм	600	900	600	782,8
S'_K , мм	327,04 / 318,04	475,5 / 465,0	314,7 / 309,0	372,8 / 376,2
R_1 , мм	-1015,1 / -1047,9	-1087,1 / -1127,3	-1164,3 / -1172,5	-1480,9 / -1472,3
R_2 , мм	-314,7 / -308,3	-421,1 / -415,2	-327,1 / -324,4	-425,8 / -426,6
R_3 , мм	-447,6 / -442,7	-655,1 / -664,5	-457,9 / -451,2	-608,6 / -603,9
S'_O , мм	853,8 / 764,6	1041,3 / 986,5	756,4 / 725,9	758,5 / 783,0
k_1	-0,9783 / -0,9788	-0,9705 / -0,9709	-0,9772 / -0,9777	-0,9695 / -0,9691
k_2	-3,5220 / -3,5684	-3,2537 / -3,2773	-3,7799 / -3,8130	-4,0647 / -4,0108
k_3	-0,5849 / -0,5831	-0,5479 / -0,5404	-0,5588 / -0,5604	-0,4971 / -0,4992
$S'_{p'}$, мм	-725,5	-933	-688,5	-744,8
M_D ($v=58 \text{ мм}^{-1}$)	0,413	0,371	0,398	0,340
M_O (мер/сгр) (ω°)	0,408/0,408 (0°)	0,351/0,351 (0°)	0,392/0,392 (0°)	0,340/0,340 (0°)
M_1 (мер/сгр) (ω°)	0,407/0,402 ($0,5^\circ$)	0,347/0,341 ($0,8^\circ$)	0,392/0,390 ($0,5^\circ$)	0,340/0,340 ($0,35^\circ$)
M_2 (мер/сгр) (ω°)	0,387/0,384 ($0,85^\circ$)	0,357/0,354 ($1,2^\circ$)	0,394/0,394 ($0,75^\circ$)	0,339/0,339 ($0,5^\circ$)
$\Delta y'$, %	-0,0004	-0,0017	-0,0013	0,0002

Висновки до розділу 6

1. Розроблено нові методи вимірювання основних характеристик космічних оптико-електронних систем ДЗЗ, а саме геометричне і радіометричне калібрування, коефіцієнт розсіювання об'єктів, деформація дзеркал об'єктива. Дослідження цих методів дозволило отримати такі результати:

1.1. Розроблено метод геометричного калібрування ОЕС ДЗЗ з застосуванням еталонного контрольного елементу (КЕ). Цей метод дозволяє вимірювати кутові відстані між нормаллями до «нульової» грані КЕ сканера і положеннями візирної осі на краях ПЗЗ-лінійки. Для реалізації даного методу був розроблений колімаційний вимірювальний комплекс і алгоритм розрахунку кутового положення оптичної осі об'єктива відносно ПЗЗ-лінійки.

1.2. Розроблено метод вимірювання абсолютної спектральної чутливості спектрального каналу сканера заснований на роздільному визначенні його відносної спектральної чутливості, за допомогою монохроматичного випромінювача, що перебудовується по довжині хвилі, і наступної абсолютизації її значення за допомогою дифузійного випромінювача, виконаного у вигляді неповної інтегруючої сфери та використанні абсолютного радіометру.

1.3. Запропоновано новий метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів та виробів на їх основі і установку для його реалізації, що забезпечує, в порівнянні з стандартизованою установкою: зменшення внутрішнього діаметру фотометричної кулі (напівкулі) до 5 разів; зменшення відносної похибки вимірювання від 2 до 10 разів; зниження вимоги до яскравості темного фону порівняно з вимогою до яскравості чорного предмета від 27 до 53 разів; розширення функціональних можливостей контролю - є можливість визначати кількість розсіюючих конструктивних

елементів об'єктива, порядок їх розташування вздовж оптичної осі об'єктива та вклад кожного з них у величину коефіцієнта розсіювання об'єктива.

1.4. Запропоновано новий метод моделювання полегшення дзеркал за рахунок конструктивних вибірок при забезпеченні достатніх жорсткості та міцності, що необхідні при виготовленні, проведенні контрольних операцій та виведенні супутника на орбіту. За допомогою програм ANSYS та Deform було проведено оптимізацію великогабаритного вісесиметричного дзеркала для сканера надвисокої роздільної здатності. Найбільш оптимальним варіантом полегшення такого дзеркала є шестикутні отвори в задній стінці дзеркала з кріпленням дзеркала на три отвори в задній частині дзеркала. Коефіцієнт полегшення такого дзеркала сягає 75%, а деформація робочої поверхні в 10 разів менше, ніж у дзеркала без полегшення.

2. З метою підтвердження результатів фізико-математичного моделювання ОЕС космічного базування, що наведені в попередніх розділах, було проведено експериментальне дослідження тепловізійної камери з мікроболометричною матрицею, яке дало такі результати:

2.1. Для проведення експериментів було розроблено та виготовлено випробувальний стенд фізичної моделі інфрачервоного спектро радіометра з підвищенням просторової роздільної здатності за рахунок субпіксельної обробки зображень.

2.2. Експериментальні дослідження мінімально роздільної різниці температур інфрачервоного спектро радіометра свідчать про те, що при застосуванні субпіксельної обробки двох кадрів, отриманих субпіксельною реєстрацією в декількох спектральних діапазонах, відбувається підвищення роздільної здатності на частоті Найквіста приблизно в 1,4 рази.

3. Комп'ютерні дослідження за допомогою програми ZEMAX оптичних систем об'єктів, які були розраховані за допомогою розроблених методів проектування об'єктів для систем ДЗЗ з заданими властивостями, підтвердили ефективність цих методів.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена наукова проблема підвищення просторового та енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з метою підвищення їх характеристик шляхом розробки нових методів проектування та контролю їх основних характеристик.

При виконанні дисертаційної роботи здобувачем були отримані такі наукові результати:

1 Аналіз основних існуючих космічних оптико-електронних систем (ОЕС) ДЗЗ, їх характеристик та тенденцій розвитку цих систем дав можливість класифікувати їх на системи спостереження високого (СВПР) та надвисокого просторового розділення (СНВПР), інфрачервоні системи та гіперспектральні.

1.1. ОЕС високого та надвисокого розділення використовують в об'єктивах дзеркальну схему Корша, або дзеркально-лінзову схему Рітчі-Кретена й мають діаметр вхідної зіниці більшим за 500 мм, фокусну відстань від 5000 мм до 13000 мм і ширину смуги огляду від 9,4 км до 55 км.

1.2. Більшість ІЧ сканерів для формування зображення використовують оптико-механічне сканування і тільки в сканерах Bird і в NIRST використовується метод “push-broom” сканування ПЗЗ-лінійкою.

1.3. Одним із перспективних напрямків космічних досліджень поверхні Землі є використання гіперспектрометрів, які мають просторове розділення 30...70 м і спектральне розділення порядку 10 нм.

2. Удосконалено фізико-математичну модель СВПР і СНВПР шляхом врахування впливу особливостей експлуатації сканерів на їх МПФ, дослідження якої дало можливість:

2.1. Отримати формулу для знаходження необхідного діаметра апертури об'єктива D_p залежно від заданого просторового розділення,

висоти орбіти супутника, робочого спектрального діапазону оптичної системи, необхідного значення МПФ об'єктива на частоті Найквіста та коефіцієнту екранування об'єктива. Показано, що оптимальним діаметром апертури D_p для отримання просторового розділення, близького до геометричної проекції пікселя GSD , є діапазон $320 \leq D_p \cdot GSD \leq 370$, при якому МПФ на частоті Найквіста знаходиться в межах $0,21 \leq M(\nu_N) \leq 0,26$.

2.2. Розроблено математичну модель для дослідження впливу на МПФ сканера нестабільності положення осі і вібрацій космічного апарату (КА), нестабільності висоти польоту КА, обертання земної кулі, відхилення візирної осі від надиру при зйомці з змінними кутами візування.

3. Запропоновано абераційні моделі нових оптичних систем сканерів СВПР і СНВПР, які дозволили дослідити три об'єктива. Вперше отримано аналітичні залежності, що зв'язують конструктивні параметри об'єктивів для отримання дифракційної якості зображення, які покладені в основу експрес-методу розрахунку двох типів об'єктивів - трьохдзеркального квазіортоскопічного об'єктиву з позаосьовим збільшеним полем зору та трьохдзеркального вісесиметричного об'єктиву.

4. Удосконалена модель ІЧ системи спостереження, яка враховує особливості її застосування на КА з метою підвищення якості зображення.

4.1. На основі цієї моделі отримано нове рівняння для розрахунку основної характеристики космічного тепловізора – мінімальної роздільної різниці температур (МРРТ), яке враховує роботу тепловізійної камери без участі спостерігача.

4.2. Запропоновано новий метод для підвищення просторового розділення в ІЧ багатоспектральних космічних ОЕС ДЗЗ, який полягає в сумісній обробці субпіксельно зміщених зображень від різних спектральних діапазонів, які попередньо перераховані на єдину фізичну величину, незалежну від спектрального діапазону, температуру Земної поверхні.

4.3. Запропоновано новий підхід та отримані аналітичні залежності розрахунку трьохлінзового атермального об'єктиву для ІЧ області спектру, які поєднують вибір характеристик матеріалів, оптичних сил лінз та відстаней між ними для утримання площини фокусування об'єктиву в площині фотоприймача при різних температурах експлуатації ОЕС. Це дозволило розрахувати трилінзовий об'єктив, що має фокусну відстань 112 мм, відносний отвір 1:1, що може працювати без терморозфокусування в діапазоні температур від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

5. Проведені дослідження оптичних систем сучасних гіперспектрометрів з диспергуючими елементами у вигляді дифракційних ґраток і призм, а також Фур'є-спектрометрів дозволили встановити їх переваги і недоліки. Запропоновано оптичну схему перспективного супутникового гіперспектрометра з покращеними характеристиками: робочий спектральний діапазон – 0,4...2,5 мкм; спектральне розділення – 6...30 нм; кількість спектральних каналів – 150; просторове розділення на місцевості – 45 м; ширина смуги огляду – 46 км.

6. Розроблено нові методи вимірювання основних характеристик космічних ОЕС, а саме: геометричне і радіометричне калібрування, коефіцієнт розсіювання об'єктивів, деформація дзеркал об'єктива. Дослідження цих методів дозволило отримати такі результати:

6.1. Розроблено метод геометричного калібрування ОЕС ДЗЗ з застосуванням еталонного контрольного елемента. Для реалізації даного методу був розроблений колімаційний вимірювальний комплекс і алгоритм розрахунку кутового положення оптичної осі об'єктива відносно ПЗЗ-лінійки.

6.2. Розроблено метод вимірювання абсолютної спектральної чутливості спектрального каналу сканера заснований на роздільному визначенні його відносної спектральної чутливості, за допомогою монохроматичного випромінювача, що перебудовується по довжині хвилі, і

наступної абсолютизації її значення за допомогою дифузійного випромінювача, виконаного у вигляді неповної інтегруючої сфери та використанні абсолютного радіометру.

6.3. Вперше запропоновано новий метод вимірювання коефіцієнтів розсіювання об'єктів, який базується на порівнянні освітленостей в фокальній площині об'єктива виробу при освітлені його вхідного отвору джерелом випромінювання при двох положеннях джерела випромінювання відносно вхідного отвору об'єктива, що забезпечує в порівнянні з стандартизованою установкою: зменшення внутрішнього діаметру фотометричної кулі (напівкулі) до 5 разів; зменшення відносної похибки вимірювання від 2 до 10 разів; зниження вимоги до яскравості темного фону порівняно з вимогою до яскравості чорного предмета від 27 до 53 разів; розширення функціональних можливостей контролю - є можливість визначати кількість розсіюючих конструктивних елементів об'єктива, порядок їх розташування вздовж оптичної осі об'єктива та вклад кожного з них у величину коефіцієнта розсіювання об'єктива.

6.4. Запропоновано новий метод моделювання полегшення дзеркал за рахунок конструктивних вибірок при забезпеченні достатніх жорсткості та міцності, що необхідні при виготовленні, проведенні контрольних операцій та виведенні супутника на орбіту. Найбільш оптимальним варіантом полегшення такого дзеркала є шестикутні отвори в задній стінці дзеркала з кріпленням дзеркала на три отвори в задній частині дзеркала. Коефіцієнт полегшення такого дзеркала сягає 75%, а деформація робочої поверхні в 10 разів менше, ніж у дзеркала без полегшення.

6.5. З метою підтвердження результатів моделювання тепловізійної камери з мікроболометричною матрицею космічного базування було проведено експериментальне дослідження камери шляхом вимірювання MRPT. Отримані результати підтвердили отриману формулу для розрахунку MRPT і підвищення роздільної здатності на частоті Найквіста в 1,4 рази при застосуванні субпіксельної обробки зображень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kuenzer C. Thermal Infrared Remote Sensor / C. Kuenzer, S. Dech. – Springer (Germany), 2013. – 546p.
2. Василейский А.С. Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса / А.С. Василейский, М.М. Железнов, Я.Л. Зиман, И.В. Полянский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – В.2. – Т.1. – С. 216–221.
3. Кондратьев К.Я. Новое в дистанционном зондировании окружающей среды / К.Я. Кондратьев, Д.В. Позднякова // Исследование Земли из космоса. – 1996. – №1. – С.107–124.
4. Зубко В. П. Огляд стану та тенденцій розвитку дистанційного зондування Землі / В.П. Зубко, П.Я. Іськов, І.Я. Подолук, Я.І. Стефанидин // Космічна наука і технологія. – 1998. – Т. 4. – № 5/6. – С. 67–87.
5. Driggers R.G. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems / R.G. Driggers, M.H. Friedman, J. Nichols. – London: Artech House, 2012. – 600 p.
6. Козинцев В.И. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528с.
7. Блажевич С.В. Синтез космического изображения улучшенной разрешающей способностью на основе субпиксельного сканирования / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Н.Н. Ушакова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т.7. – № 2. – С. 9–13.
8. Tang H. Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications / H. Tang, Z.-L. Li. – Berlin: Springer-Verlag, 2014. – 281 p.
9. Анатолев А.Ю. Оценка информационных возможностей космических оптико-электронных систем дистанционного

- зондирования /А. Ю. Анатольев, А.С. Батраков, А.М. Федына // Оптический журнал. – 2000. – №7. – С. 12-18.
10. Тягур В.М. Обоснование технического облика бортового оптико-электронного комплекса среднего пространственного разрешения перспективного спутника дистанционного зондирования Земли / В.М. Тягур, М.А. Попов, Н.И. Лихолит, С.А. Станкевич, С.П. Ковальчук, С.П., В.В. Полежаев // Сборник тезисов VII конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М: ИКИ РАН, 2009. – С. 118.
 11. Тягур В.М. Досягнення і проблеми розвитку аерокосмічних оптико-електронних сенсорів ДЗЗ / В.М. Тягур, М.І. Лихоліт, В.В. Полежаєв, С.А. Станкевич // The First Ukrainian Conference with international participation. – Kyiv. – 2008. – P. 23–25.
 12. Тягур В.М. Оптические системы ДЗЗ проекта “Egypsat-1” / В.М. Тягур, М.І. Лихоліт, І.Е. Гринюк, В.В. Полежаєв // VIII Международная конференция «Прикладная оптика – 2008»: Санкт-Петербург. – 2008 – С. 81–86. (-)
 13. Тягур В.М. Оптические системы многоспектрального сканера и сканера среднего ИК-диапазона для дистанционного зондирования Земли /В.М. Тягур, В.В. Рыбак // Международная научная конференция «Независимый Казахстан: 20 лет развития космических исследований». Алматы, Казахстан. – 2011. – С. 32–34.
 14. Пат. 2333518 Россия, МКВ G02B17/08. Дзеркально-линзовий об'єктив / Полежаєв В.В., Коршунова Г.Є., Тягур В.М. – Опубл. в Б.И., 2008, №25.
 15. Burshtynska K. Space remote sensing systems transmission capabilities modeling / K. Burshtynska, I. Dolynska // Geomatics Landmanagement and Landscape. – 2013. – No. 3. – P. 27–35.

16. Севастьянов Н.Н. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли / Н.Н. Севастьянов, В.Н. Бранец, В.А. Панченко, Н.В. Казинский, Т.В. Кондранин, А.С. Негодяев // Труды МФТИ. – 2009. – Том 1, №3. – С.14–22.
17. Dial G. **IKONOS** satellite, imagery, and products / Gene Dial, Howard Bowen, Frank Gerlach, Jacek Grodecki, Rick Oleszczuk // Remote Sensing of Environment. – 2003. – Vol. 88. – P. 23–26.
18. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/ikonos-2>
19. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/q/quickbird-2>
20. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-2>
21. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-3>
22. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/eros-b>
23. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/geoeye-1>
24. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cartosat-2>
25. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/k/kompsat-2>
26. Lee E.S., Lee D.G., Lee S.H. Opto-mechanical design and analysis of the MSC on the **KOMPSAT-2** // 20th Congress of the International Commission for Optics. – Changchun, China. – 2005. – P. 121–124.
27. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/pleiades>
28. Renard C. From sed hi concept to Pleiades fm detection unit measurements / C. Renard, D. Dantes, C. Neveu, J. Lamard, M. Oudinot, A. Materne // 6th Internat. Conf. on Space Optics'. – ESTEC, Noordwijk: Netherlands. – 2006. –Proc. of SPIE Vol. 10566 105662W-2. – P. 256–264.
29. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/k/kompsat-3A>
30. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/asnaro>

31. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/alos-3>
32. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/resurs-dk1>
33. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gaofen-2>
34. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dubaisat-2>
35. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/deimos-2>
36. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/skysat>
37. Design concept MODIS / <http://modis.gsfc.nasa.gov/about>
38. Fujisada H. Overview of ASTER instrument on EOS-AM1 platform/ Fujisada H. // Proc. of SPIE. – Vol. 2268. – P.14–36.
39. Landsat-7 / http://ru.wikipedia.org/wiki/Landsat_7
40. The Landsat-7 Science Data User's Handbook /
http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter3/chapter3.html
41. RUSSIAN EARTH OBSERVATION SATELLITES: STATUS REPORT /
http://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/itsc/itsc15/presentations/session10/10_4_uspen_sky.pdf
42. Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR /
<http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>
43. Hugo Marraco and Linh Ngo Phong. NIRST, a satellite based IR instrument for fire and sea surface temperature measurement /
<http://www.fcaglp.unlp.edu.ar/~hmarraco/trabajos/NIRST.pdf>
44. Hugo Marraco GENERAL DESCRIPTION SCOPE OF THE NIRST EXPERIMENT / <http://www.conae.gov.ar/satelites/NIRST.pdf>
45. Pope T. 512x3 PIXEL UNCOOLED FPA FOR THERMAL INFRARED PUSHBROOM IMAGING / T. Pope, C. Chevalier, C. Alain
<http://www.ino.ca/Docs/Documents/publications/scientific/512X3+pixel+uncooled+FPA+for+thermal+infrared+pushbroom+imaging.pdf>
46. Phong L. Canadian microbolometer technology for future space missions / L. Phong and Z. Wanping //
http://ssed.gsfc.nasa.gov/code693/tdw03/proceedings/docs/session_2/Ngo.pdf

47. Marine Observation Satellites Sensors /
http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter2/13_e.php
48. Chander G. An Overview of the CBERS-2 satellite and comparison of the CBERS-2 CCD data with the L5 TM data / G. Chander //
http://calval.cr.usgs.gov/JACIE_files/JACIE06/Files/37Chande.pdf
49. Тягур В.М. Перспективи використання інфрачервоного аерознімання для вирішення природо ресурсних спеціальних задач / В.М. Тягур, М. О. Попов, С.А. Станкевич, М.І. Ліхоліт, В.В. Полежаєв, О.В. Титаренко // Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій. – Матеріали науково-практичної конференції. – Київ. – 2011. – С. 33–39.
50. Еремеев В.А. Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных / В.А. Еремеев, И.Н. Мордвинцев, Р.Г. Платонов // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 6. – С. 80–90.
51. Schaepman M.E., The Future of Imaging Spectroscopy – Prospective Technologies and Applications / M.E. Schaepman, R.O. Green, S.G. Ungar et al. // Proceedings of IGARSS 2006 and 27th Canadian Symposium on Remote Sensing. – Denver, 2006. – P. 205–209.
52. Birk R.J. Airborne Hyperspectral Sensor Systems / R.J. Birk , T.B. McCord // IEEE Aerospace and Electronics System Magazine. – 1994. – No.9. – P. 26–33.
53. Guanter L. First Results From the PROBA/CHRIS Hyperspectral/Multiangular Satellite System over Land and Water Targets / L. Guanter, L. Alonso, J. Moreno // IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters. – 2005. – Vol. 2. – No.3. – P. 250–254.
54. Mall U. "SIR - 2: The NIR Spectrometer for the Chandrayaan-1 Mission," / U. Mall, A. Nathues, H. U. Keller // 37th AAS Division for Planetary Sciences Meeting, Session 57, Cambridge, UK. – 2005. – Bulletin of the American Astronomical Society. – Vol. 37. – P. 749.

55. Донец В.В. Моноблочные конструкции бортовых и полевых гиперспектрометров / В.В. Донец, А. Ю. Цымбал, В. В. Бровченко // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т. 18. – № 4. – С. 37–44.
56. Stuffer T. "The EnMAP Hyperspectral Imager - An Advanced Optical Payload for Future Applications in Earth Observation Programs," / T. Stuffer, C. Kaufmann, S. Hofer, K. P. Förster et al // Proceedings of the 57th IAC (International Astronautical Congress). – Valencia (Spain). – 2007. – Vol. 61. – P. 115–120.
57. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
58. Колобродов В. Г. Вплив аберацій об'єктива на просторове розділення космічного сканера / В.Г. Колобродов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2000. – № 5.– С. 110–112.
59. Braat J. Imaging Optics / J. Braat, P. Torok. – Cambridge University Press, 2019. – 972 p.
60. Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1981. – 432 с.
61. Vollmer M. Infrared Thermal Imaging, Fundamentals, Research and Applications. Second Edition / M. Vollmer, K.-P. Mollmann. – Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2018. – 770 p.
62. Tiagur V.M. Design of compact multiband satellite imager using complex mathematical model / V.M. Tiagur, A.L. Makarov, L.V. Varichenko, N.I. Lykholit, I.E. Hrynyuk I.E. // Abstracts book of 22nd General Congress of the International Commission for Optics (ICO-22). Proc. SPIE 8011, 80111T (2011) – Puebla:, Mexico. – 2011. – P. 151–152.
63. Тягур В.М. Оптимізація габаритно-вагових параметрів систем ДЗЗ надвисокої просторової роздільної здатності / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XVII науково-технічної конференції

- “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – К.: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2018. – С. 37–38.
64. Кирилин А.Н. Влияние надёжности бортовых систем космических аппаратов ДЗЗ на показатели периодичности съёмки / А. Н. Кирилин, В. И. Куренков, В. А. Капитонов, Н. Р. Стратилатов, В. В. Лохматкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – №4 (42). – С. 170–180.
 65. Макаров А.Л. Управление процессом съёмки поверхности земли с помощью спутников / А.Л. Макаров // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 3 (100). – С. 101–109.
 66. Тягур В.М. Просторове розділення системи дистанційного зондування при зміні кута візування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2018. – №1. – С.54–64.
 67. Tiagur V.M. Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles / V. G. Kolobrodov, C.V. Dobrovolska, V. I. Mykytenko, G.S. Tymchik // Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. – 2017. – 104450J. – doi: 10.1117/12.2280909; <https://doi.org/10.1117/12.2280909>
 68. Тягур В.М. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.07 «Оптичні прилади та системи». – Київ, НТУУ «КПІ». – 2008.
 69. Тягур В.М. Модуляційна передавальна функція системи дистанційного зондування при відхиленні осі візування від надира / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2018. – №6. – С. 51–65.
 70. Boreman G. D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems / G.D. Boreman. – Washington, USA: SPIE Press, 2001. – 112 p.
 71. Capderou M. Satellites Orbits and Missions / Michel Capderou. – Springer-Verlag France. – 2005. – 558 p., ISBN 2-287-21317-1.

72. Capderou M. Satellites Orbits and Missions / Michel Capderou. – Springer International Publishing Switzerland. – 2014. – 922 p., ISBN 978-3-319-03415-7, doi: 10.1007/978-3-319-03416-4.
73. Тягур В.М. Вплив кутів візування та кривизни землі на просторове розділення космічної системи / Колобродов В. Г., Тягур В.М., Пінчук Б. Ю. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2018. – № 5(121). – С. 63–75.
74. Schuster N. Infrarotthermographie. Zweite, uberarbeitete und erweiterte Ausgabe / N. Schuster, V.G. Kolobrodov // WILEY-VCH. – Berlin. – 2004. – 356 p.
75. Тягур В.М. Программа для расчета энергетических и пространственных характеристик сканера дистанционного зондирования Земли поверхностей / В.М. Тягур, А.П. Чумак, О.Ю. Сахарнова // Збірник тез доповідей IX науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2010. – С.68– 69.
76. Tiagur V.M. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System’s Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles / V.M. Tiagur, V.G. Kolobrodov, M.I. Lykholit, V.I. Mykytenko, C.V. Dobrovolska // Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotechnika Radioaparotobuduvannia. – 2017, Iss. 69. – P. 30–34.
77. Тягур В.М. Широкоугольные сканеры высокого разрешения / В.М. Тягур, Н.И. Лихолит, А.Ю. // Збірник тез доповідей X науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2011: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2011. – С.53–54.
78. Тягур В.М. Объективы систем ДЗЗ КП СПС «Арсенал» / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.28-32.
79. Лысенко А.И. Оптические схемы объективов космических телескопов / А.И. Лысенко, Е.Р. Маламед, М.Н. Сокольский, Ю.Д. Пименов, И.Е. Путилов // Оптический журнал. – 2002. – Том 69. – №9. – С.21–25.

80. Грамматин А.П. Трехзеркальный объектив телескопа без экранирования / А.П. Грамматин, А.А. Сычева // Оптический журнал. – 2010. – Том 77. – №1. – С.24–27.
81. Вычислительная оптика: Справочник // М.М. Русинов, А.П. Грамматин, П.Д. Иванов. – Л: Машиностроение, 1984. – 423 с.
82. Пат. 4240797, USA. All-reflective three element objective / Wetherell W.B., Womble D.A. – 1980.
83. Пат. 426551, USA. Three mirror anastigmatic optical system / Cook L.G. – 1981.
84. Пат. 4733955, USA. Reflective optical triplet having a real entrance pupil / Cook L.G. – 1988.
85. Пат. 4834517, USA. Method and apparatus for receiving optical signals / Cook L.G. – 1989.
86. Пат. 4834517, USA. Common axis three mirror anastigmatic optic / Vanstone G.C., Carter J.A., Stoppenbach D.J. – 2007.
87. Пат. 10274740, Япония. Catoptric system / Mitumasa M., Hisahiro O., Toshihiro O., Hironobu S. – 1998.
88. Пат. 1846792, Европа. Three mirror anastigmatic telescope // Aharon N. – 2006.
89. Пат. 2327194, Россия. Трехзеркальная оптическая система без экранирования / Грамматин А.П., Грязнов Г.М., Стариченкова В.Д. – 2006.
90. Пат. 82876, Россия. Трехзеркальная оптическая система без экранирования / Данилов В.А., Путилов И.Е., Савицкий А.М., Сокольский М.Н., Лысенко А.И. – 2008.
91. Пат. 106764, Россия. Трехзеркальная оптическая система без экранирования / Любанец Г.К., Секержицкий О.В., Троняк Б.Д., Чеботарев А.В., Черных И.В., Черняк Н.А. – 2011.
92. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение. – 1969. – 672 с.

93. Пат. 94303, Україна, МКВ G02B 17/00. Три дзеркальний анастигматичний квазіортоскопічний об'єктив / Тягур В.М., Лихоліт М.І., Гринюк І.Є. – Опубл. в Б.И., 2011, №8.
94. Тягур В.М. Трехзеркальный анастигматический квазиортоскопический объектив с внеосевым полем / В. М. Тягур, Н. И. Лихолит // Космічна наука і техніка. – 2015. – Т. 21. – №2. – С. 27–33.
95. [Tiagur V.M.](#) Three-mirror anastigmatic quasi-ortoscopic lens / V.M. Tiagur // Proceeding of 2016 China-Ukraine forum on Science and Technology. – 2016. – P. 132.
96. Пат. 4101195, USA. Anastigmatic three-mirror telescope / Korsch D.G. – 1978.
97. Цуканова Г.И. Трехзеркальные ортоскопические объективы с промежуточным изображением / Г.И. Цуканова // Оптический журнал – 1999. – Т 66. – №12. – С. 21–23.
98. Пат. 113104 Україна, МКВ G02B 17/00; G02B 17/06. Тридзеркальний анастигматичний бездисторсійний об'єктив / Тягур В.М., Лихоліт М.І. – Опубл. 12.12.2016. Бюл. №23.
99. Тягур В.М. Тридзеркальний анастигматичний осесиметричний об'єктив з виправленою дисторсією / В.М. Тягур // Космічна наука і техніка. – 2017. – Т. 23. – №5. – С. 55–61.
100. Тягур В.М. Оптико-электронные системы ДЗЗ сверхвысокой разрешающей способности / В.М. Тягур // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса – 2016. – С. 228.
101. Пат. 94157 Україна, МКВ G02B 23/02. Спосіб створення електронного зображення Землі у космічному сканері і пристрій для його реалізації / Тягур В.М., Гринюк І.Є., Лихоліт М.І., Пасько І.М., – Опубл. 2011. Бюл. №7.

102. Колобродов В. Г. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування) / В.Г. Колобродов, Н. Шустер. – К.: Тираж, 1999. – 340 с.
103. Kaplan H. Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment / H. Kaplan. – Washington: SPIE. – Optical Engineering Press, 1999. – 164 p.
104. Infrared Thermography / Edited Raghu V. Prakash. – Croatia: Intechopen.com. – 2012. – 236 p.
105. Тягур В.М. Мікроболометрична матрична камера дальнього інфрачервоного діапазону для космічної зйомки / В.М. Тягур, М.О. Попов, М.І. Лихоліт, С.А. Станкевич, О.В. Тітаренко // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С.68-69.
106. Тягур В.М. ИК-камера космического базирования с микроболометрической матрицей / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «ABIA-2013». – Київ – С. 27.41-27.44.
107. Тягур В.М. Основные характеристики ИК камер для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И.. Лихолит, В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Е.В. Добровольская // Збірник тез доповідей XIII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2014. – С.47.
108. Tyagur V. Functional model of the new multiband infrared radiometer for “Sich” Earth observation satellite system / V. Tyagur, S. Stankevich, M. Popov, S. Shklyar, C. Dobrovolska // Тези доповідей на 14-й Український конференції з космічних досліджень. – Ужгород. – 2014. – С.72.
109. Тягур В.М. Математическое моделирование тепловизионного прибора наблюдения с микроболометрической матрицей / В.М. Тягур, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // «Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування» – 2014. – №48 (2). – С. 28–38.

110. Wolf W.L. Introduction in Infrared System Design / W.L. Wolf. – SPIE Optical Engineering Press. – 1996. – 132 p.
111. Tissot J.L. IR detection with uncooled focal plane arrays. State-of-art and trends / J.L. Tissot // Opto-electronics review. – 2004. – №12(1). – P.105–109.
112. Driggers Ronald G. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. Second Edition // Ronald G. Driggers, ect. – Artech House. – 2012. – 583 p.
113. Fiete Robert D. Modeling the imaging chain of digital cameras / Robert D. Fiete. – SPIE. – 2010. – 225 p. ISBN 978-0-8194-8339-3.
114. Хребтов И.А. Неохлаждаемые тепловые матричные приемники ИК излучения / И.А. Хребтов, В.Г. Маляров // Оптический журнал. – 1997. – №6. – С. 3–17.
115. Карасик В. Е. Лазерные системы видения / В.Е. Карасик, В.М. Орлов В. М.– М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2001. – 352 с.
116. Тягур В.М. Визначення нормованого радіуса кружка розсіювання тепловізора за допомогою програмного моделювання / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 69–72.
117. Тягур В.М. Исследование влияния параметров микроболометрических матриц на характеристики ИК камер космического базирования / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихоліт Н.И. // Збірник тез доповідей XIV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2015. – С. 69-70.
118. Тягур В.М. Мінімальна розділювана різниця температур тепловізора космічного базування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20. – №1. – С. 23–27.
119. Тягур В.М. Математична модель сканера дальнього інфрачервоного діапазону / В.М. Тягур, К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт

- // Збірник тез доповідей V науково-практичної конференції “Погляд у майбутнє приладобудування”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 78.
120. Katayama H. Development of the Compact Infraed Camera (CIRC) for Earth Observation / H. Katayama, M. Haiton, M. Suganuma, M. Harada, Y. Okamura, K. Nakau, Y. Tange // Trans. JSASS Aerospace Tach. Japan. – 2010. – Vol. 8. – No. ists27. – P. Tn_1-Tn_4.
 121. Конозенко И.Д. Полупроводниковые болометры / И.Д. Конозенко // Успехи физических наук. – 1955. – Т. LVI. – Вып. 2. – 308 с.
 122. Latry C. Staggered arrays for high resolution earth observing systems / C. Latry // Proceedings of SPIE. – 2009. – Vol.7452.– P.745200.
 123. Monreal J.G. Optical and geometrical super-resolution / J.G. Monreal // Optical and Digital Image Processing: Fundamentals and Applications / G. Cristobal, P. Schelkens, H. Thienpont (Editors).– Singapore: John Wiley, 2011.– P.593– 612.
 124. Тягур В.М. Методы повышения пространственного разрешения тепловизионных камер с матричными приемниками излучения / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов В.Г., Н.И. Лихоліт // Озброєння та військова техніка. – 2014. – №3. – С. 56–62.
 125. Tiagur V.M. Image Resolution Enhancement in IR Device With Focal Plane Array / V.M. Tiagur, E.V. Kharitonenko, V.G. Kolobrodov, N.I. Lykholit // “Scientific Works of 13-th International Young Scientists Conference”. – Kyiv. – 2012. – P. 168.
 126. Пат. 96354 Україна, МКВ G06K 9/64. Пристрій для підвищення просторової розрізненості багатоспектральних аерокосмічних зображень на основі класифікування спектральних сигнатур об’єктів / Попов М.О., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Ліхоліт М.И., Полежаєв В.В., Тягур В.М. – Опубл. 2011. Бюл. №20.
 127. Пат. 109181 Україна, МКВ G01C 3/08. Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної

- реєстрації зображень та пристрій для його здійснення/ Лихоліт М.И., Лялько В.І., Попов М.О., Станкевич С.А., Тягур В.М., Харитоненко К.В. – Опубл. 2015. Бюл. №14.
128. Тягур В.М. Субпіксельна обробка інфрачервоних космічних зображень з метою підвищення їх роздільної здатності / В.М.Тягур, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, К.В. Харитоненко // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С.53-54.
129. Крылов А.С. Компьютерное повышение разрешения изображений с использованием методов математической физики / А.С. Крылов, А.В. Насонов.– М: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011.– 72 с.
130. Tyagur V. Subpixel Resolution Satellite Imaging Technique / V. Tyagur, S. Stankevich, S. Shklyar // Digital Technologies, Proceedings of the Ninth International Conference. – ZILINA, SLOVAKIA. – 2013. – P. 81– 84.
131. TYAGUR Vladimir M. Satellite imagery resolution enhancement using subpixel frames acquisition / Sergey A. STANKEVICH, Sergey V. SHKLYAR, Vladimir M. TYAGUR // Journal of Information, Control and Management Systems, Vol. 11, (2013), No. 2 – P. 135–145.
132. Tyagur V. Subpixel processing of images from the frame infrared camera for future Ukrainian remote sensing satellite system / V. Tyagur, S. Stankevich, M. Popov, V. Lyalko, S. Shklyar, C. Dobrovolska, N. Likholyt // Digital Technologies, Proceedings of the 10th International Conference. – ZILINA, SLOVAKIA. – 2014. – P. 232–235.
133. Тягур В.М. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності дистанційної зйомки / К.В. Добровольська, М. І. Лихоліт, В. М. Тягур, М.О. Попов, С.А. Станкевич // Тезисы докладов на XVI Международной молодежной научно-практической конференции «Человек и космос». – Днепропетровск. – 2014. – С. 133–135.

134. Тягур В.М. Модуляционная передаточная функция микроболометрической матрицы при использовании субпиксельной регистрации изображений / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса – 2016. – С. 195.
135. Тягур В.М. Математична модель тепловізійної камери космічного базування з субпиксельною реєстрацією зображень / В. М. Тягур, К.В. Добровольська, М. І. Лихоліт, Колобродов В.Г. // Тези доповідей на 14-й Українській конференції з космічних досліджень. – Ужгород. – 2014. – С.74.
136. Тягур В.М. Целостная технология получения изображений повышенного пространственного разрешения от перспективного спутникового инфракрасного спектрорадиометра / В.М. Тягур, Н.І. Лихоліт, В.І. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич, К.В. Добровольська // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса – 2016. – С. 225.
137. Пат. 117909 Україна, МКВ G01C 3/08 Інфрачервоний матричний знімальний спектрорадіометр субпиксельної розрізненості / Тягур В.М., Лихоліт М.І., Лялько В.І., Попов М.О., Станкевич С.А., Добровольська К.В. – Опубл. 25.10. 2018, №20..
138. Jamison T.H. Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint / T.H. Jamison T.H. // Optical Design. – 1992. – V. CR43. – P. 131–159.
139. Тягур В.М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового апохромата / В.М. Тягур, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81. – №4. – С.42–47.
140. Тягур В.М. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / В.М. Тягу, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2012. – №5. – С.114–117.

141. Пат. 108282 Україна, МКВ G02В 9/14; G02В 13/14 . Трилінзовий атермальний світлосильний об'єктив для інфрачервоного діапазону спектра / Тягур В.М., Лихоліт М.І., Варьонова Г.Л. – Опубл.10.04.2015. Бюл. №7.
142. Тягур В.М. Атермальний об'єктив для ИК-сканера ДЗЗ, працюючий в діапазоні температур -10°C до +50°C / В.М. Тягур, Н.І. Лихолит, А.Л. Варенова, В.І. Парубец // Збірник тез доповідей XII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КП”. – 2013. – С.61–62.
143. Тягур В.М. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра із субпіксельним підвищенням просторової розрізненості / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.І. Лихоліт, К.В. Добровольська та інші // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С. 33–35.
144. Tiagur V.M. Accuracy Improvement Of The Land Surface Physical Paramemers Estimation By Infrared Satellite Imaging / V. M. Tiagur, S.A. Stankevich, C. V. Dobrovolska, N.S. Lubsky N.S. // Збірник тез доповідей 15 Української конференції з космічних досліджень. – Одеса. – 2015. – С. 212.
145. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов.– М.: Советское радио, 1978. – 400 с.
146. Kealy P.S. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures / P.S. Kealy, S.J. Hook // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.– 1993.– Vol. 31.– No 6.– P.1155–1164.
147. Wan Z. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space / Z. Wan, J. Dozier // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1996.– Vol. 34. – No 4.– P.892–905.

148. Jiménez-Muñoz J.C. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data / J.C. Jiménez-Muñoz, J.A. Sobrino // *Journal of Geophysical Research.*– 2003.– Vol.108. – No D22.– P. 4688–4696.
149. Prata A.J. Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects / A.J. Prata, V. Caselles, C. Coll, A. Sobrino, C. Ottlé // *Remote Sensing Reviews.*– 1995.– Vol. 12. – No 3-4. – P.175–224.
150. Berk A. MODTRAN5: 2006 Update / A. Berk, G.P. Anderson, P.K. Acharya, L.S. Bernstein, L. Muratov, J. Lee, M. Fox, S.M. Adler-Golden, J.H. Chetwynd // *Proceedings of SPIE.* – 2006. – Vol. 6233. – P. 6409–6416.
151. Ulivieri C. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites / C. Ulivieri, M.M. Castronuovo, R. Francioni, A. Cardillo // *Advances in Space Research.* – 1992.– Vol. 14. – No 3. – P. 59–65.
152. Kerr Y.H. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm / Y.H. Kerr, J.P. Lagouarde, J. Imbernon // *Remote Sensing of Environment.*–1992.– Vol. 41.–No 2.– P. 197-209.
153. Dash P. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends / P. Dash, F.M. Gottsche-Olesen, H. Fischer // *International Journal of Remote Sensing.* – 2002.– Vol. 23. – No 13. – P.2563-2594.
154. Becker F. Toward a local split window method over land surface / F.Becker, Z.-L. Li // *International Journal of Remote Sensing.*– 1990.– Vol. 1.– No 3. – P. 369–393.
155. Gillespie A. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images / A. Gillespie, S. Rokugawa, T. Matsunaga, J.S.

- Cothorn, S. Hook, A.B. Kahle // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1998. – Vol. 36. – No 4. – P.1113–1126.
156. Liang S. An optimization algorithm for separating land surface temperature and emissivity from multispectral thermal infrared imagery / S. Liang // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2001. – Vol. 39. – No 2. – P. 264–274.
157. 159. Schmugge T. Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations / T. Schmugge, A. French, J.C. Ritchie, A. Rango, H. Pelgrum // Remote Sensing of Environment.– 2002.– Vol.79.– No.2-3.– P.189-198.
158. Jiménez-Muñoz J.C. Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI / J.C. Jiménez-Muñoz, J.A. Sobrino, A. Gillespie, D. Sabol, W.T. Gustafson // Remote Sensing of Environment. – 2006. – Vol. 103. – No 4. – P. 474–487.
159. Van de Griend A.A. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces / A.A. Van de Griend, M. Owe // International Journal of Remote Sensing. – 1993. – Vol. 14. – No 6. – P. 1119–1131.
160. Mao K. An RM-NN algorithm for retrieving land surface temperature and emissivity from EOS/MODIS data / K. Mao, J. Shi, Z.-L. Li, H. Tang // Journal of Geophysical Research.– 2007.– Vol. 112. – No D21. – P. 8402–8418.
161. Payan V. Analysis of Temperature Emissivity Separation (TES) algorithm applicability and sensitivity / V. Payan, A. Royer // International Journal of Remote Sensing. – 2004. – Vol. 25. – No 1. – P.15 – 37.
162. Тягур В.М. Мікроболометрична матрична камера дальнього інфрачервоного діапазону для космічної зйомки / М.О. Попов, М.І. Ліхоліт, С.А. Станкевич, В.М. Тягур, О.В. Титаренко // Тези доповідей

- XI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”. – Київ: НТУУ “КПІ”. – 2012. – С.68 – 69.
163. Liu H. Temperature and emissivity separation methods based on TASI data / H. Liu, C. Zhang, F. Ye, J. Zhang // Proceedings of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013). – Nanjing: Atlantis Press. – 2013.– P. 685 – 688.
 164. Coll C. Adjusted normalized emissivity method for surface temperature and emissivity retrieval from optical and thermal infrared remote sensing data / C. Coll, E. Valor, V. Caselles, R. Niclòs // Journal of Geophysical Research. – 2003.– Vol. 108. – No D23. – P.4739 – 4752.
 165. Тягур В.М. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельної обробки зображень /В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.О. Попов, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // Наука та інновації, 2015. – Т.11. – № 6. – С. 16–28.
 166. Jiménez-Muñoz J.C. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data / J.C. Jiménez-Muñoz, J. Cristóbal, J.A. Sobrino, G. Sòria, M. Ninyerola, X. Pons // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47. – No 1. – P.339–349.
 167. Barsi J.A. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments / J.A. Barsi, J.R. Schott, F.D. Palluconi, S.J. Hook // Proceedings of SPIE. – 2005. – Vol. 5882.– P. 5225-5231.
 168. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. Volume 2. Atmospheric Propagation of Radiation / F.G. Smith (Ed). – Bellingham: SPIE Press. – 1993. – 334 p.
 169. Vidal A. Atmospheric and emissivity correction of land surface temperatures measured from satellite using ground measurements or satellite data / A. Vidal

- // International Journal of Remote Sensing.– 1991.– Vol.12.– No.12.– P.2449–2460.
170. Li Z. Modeling on 3D atmospheric transmission of infrared radiation / Z. Li, X. Geng, F. Li, L. Zhang // Proceedings of Asia Conference “Communications in Computer and Information Science” (AsiaSim 2012).– Part II.– Shanghai: Springer. – 2012. – P. 110–118.
 171. Seemann S.W. Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances / S.W. Seemann, J. Li, W.P. Menzel, L.E. Gumley // Journal of Applied Meteorology.– 2003.– Vol.42.– No.8.– P.1072-1091.
 172. Петров С.Б. Тенденции развития спектральной аэрокосмической аппаратуры для исследования и оперативного контроля окружающей среды / С.Б. Петров, А.П. Смирнов // Оптический журнал. – 2000. – №5. – С.82-93.
 173. Шилин Б.В. Методы дистанционного зондирования Земли (По материалам международной конференции и канадского симпозиума, июнь 1999) / Б.В. Шилин, М.А. Шубина // Геодезия и картография. – 2000.– №9.– С.50-57.
 174. Шилин Б.В. Использование видеоспектральной аэросъемки для экологического мониторинга / Б.В. Шилин, В.Н. Груздев, А.В. Марков, В.Ф. Мочалов // Оптический журнал. – 2001. – №12. – С. 41–49.
 175. Шилин Б.В. «Видиоспектральная аэросъемка – ведущее направление развития дистанционного зондирования в оптическом диапазоне/Б.В. Шилин // Оптический журнал. – 2004. – №3. – С. 29–38.
 176. Krupa T.J. Hyperspectral Imaging from Space / T.J. Krupa // Optics & Photonics News. – 2000. – Vol. – 11. – No 11 – P. 6–7.
 177. Станкевич С.А. Методологія статистичного просторово-частотного оброблення гіперспектральних аерокосмічних зображень / С.А.

- Станкевич // Геодезія, картографія і аерофотознімання. Вип.68. – Львів: Львівська Політехніка. – 2007. – С. 240–249.
178. Станкевич С.А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аерокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі / С.А. Станкевич // Доповіді НАН України. – 2006. – № 10. – С. 136–139.
 179. Кононов В.И. Связь информационных и вероятностных оценок систем формирования изображений (иконических систем) / В.И. Кононов // Оптико-механическая промышленность. – 1991. – № 11. – С. 13–18.
 180. Кононов В.И. Сравнительная оценка информативности цифровых аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения / В.И. Кононов, С.А. Станкевич // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. – 2004. – Т.17. – № 2. – С. 88–95.
 181. Станкевич С.А. Уточнення відомої емпіричної формули оцінки імовірності правильного дешифрування об'єктів на аерокосмічному зображенні / С.А. Станкевич // Праці Наукового центру ВПС України. Вип.7. – Київ: НЦ ВПС. – 2004. – С. 242–246.
 182. Станкевич С.А. Информативность оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса: практические алгоритмы / С.А. Станкевич // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т.14. – № 2. – С. 22–27.
 183. Станкевич С.А. Адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков / С.А. Станкевич, О.В. Шолоник // Праці Першої наукової конференції “Науки про Землю та космос – суспільству”. – Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України. – 2007. – С. 11-14.
 184. Станкевич С.А. Оптимизация состава спектральных каналов гиперспектральных аэрокосмических изображений при решении

- тематических задач дистанционного зондирования Земли / С.А. Станкевич // Космічна наука і технологія, – 2007. – Т.13. – № 2. – С. 25–28.
185. Попов М.А. К вопросу создания отечественного спутникового видеоспектрометра в интересах решения задач дистанционного зондирования Земли / М.А. Попов, Н.И. Лихолит, С.А. Станкевич, В.В. Полежаев, Ковальчук С.П // Тезисы докладов 2-ой международной конференции “Передовые космические технологии на благо человечества”.- Днепропетровск: КБ “Южное”. – 2009. – С. 29.
186. Тягур В.М. Возможности спутниковых гиперспектрометров при решении тематических задач природопользования, экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций / М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.П. Ковальчук, Н.И. Лихолит, В.В. Полежаев, В.М. Тягур // Збірник наукових праць 8 Міжнародної конференції “Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях”. – 2009 . – п. Рыбачье, Крым. – С. 78–82.
187. В.М. Тягур Досягнення і проблеми розвитку аерокосмічних оптико-електронних сенсорів ДЗЗ /В.М. Тягур, М.О. Попов, М.І. Лихоліт, В.В. Полежаєв, С.А. Станкевич // Матеріали доповідей Першої Всеукраїнської конференції з запрошенням закордонних учасників “Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки України”. – Київ: Наукова думка. – 2008. – С. 23–26.
188. Тягур В.М. Обоснование технического облика бортового оптико-электронного комплекса среднего пространственного разрешения перспективного спутника дистанционного зондирования Земли / Тягур В.М., Попов М.А., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Лихолит Н.И., Полежаев В.В. // Современные проблемы дистанционного зондирования

- земли из космоса. Сборник научных статей, Т.7, №2, М., ООО ДоМира, 2010. С. 293-299.
189. Пат. 96354 Україна, МКВ G06K 9/64. Пристрій для підвищення просторової розрізненості багатоспектральних аерокосмічних зображень на основі класифікування спектральних сигнатур об'єктів / Попов М.О., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Ліхоліт М.И., Полежаєв В.В., Тягур В.М. – Опубл. 2011. Бюл. №20.
 190. Колобродов В.Г. Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования / В.Г. Колобродов, П.В. Бородийчук, В.И. Микитенко // Космічна наука і технологія. – 1998. – Т.4. – №1. – С. 29–38.
 191. Тягур В.М., Оптичні системи зображуючих Фур'є – спектрометрів дистанційного зондування Землі / Н.И. Ліхолит, В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XIII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2014. – С.64–65.
 192. Пат. 6288781 USA, G01J 3/28. Imaging spectrometer / Lobb D.R. – 1998.
 193. Егорова Л.В. Фурье-спектрометры статического типа / Л.В. Егорова // Оптико-механическая промышленность. – 1992. – №2. – С. 3–14.
 194. Головин А.Д. Малогабаритный гиперспектрометр видимого и ближнего и. нфракрасного диапазонов А.Д. Головин, А.В. Демин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – №11. – С. 869–873.
 195. Тягур В.М. Оптическая система гиперспектрометра для дистанционного зондирования Земли / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей X науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2011: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2011. – С.51–52.
 196. Пат. 99217 Україна, МКВ G01J 3/12. Призмовий спектрометр / Тягур В.М., Кислий В.П., Леваш Л.В., Ліптуга А.І., Прохорович А.В. – Опубл. 2012. Бюл. №14.

197. Горбунов Г.Г. Новые применения фурье-спектрометров / Г.Г. Горбунов, Л.В. Егорова // Оптический журнал. – 2001. – №8. – С. 81–87.
198. Тягур В.М. Оптичні системи зображуючих Фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Космічна наука і техніка.– 2014. – Т. 20. – №5. – С. 35 – 40.
199. Артюхіна Н.К. Математическая модель функционирования фурье-видеоспектрометра / Н.К. Артюхіна, Т.В. Климович, М.Н. Котов // Вісник НТУУ «КПІ». – 2012. – Вип. 43. – С. 35–46.
200. Серегин А.Г. Возможности использования ФС в качестве датчика волнового фронта для фазирования мультимодульного телескопа / А.Г. Серегин, Г.Г. Горбунов // Оптический журнал. – 2002. – №11. – С.57-61.
201. Гиль С.В. Исследование интерференционного поля статического фурье-спектрометра / С.В. Гиль, Л.В. // Оптический журнал.– 1988. – №1. – С.10-14.
202. Петров С.Б. Тенденции развития спектральной аэрокосмической аппаратуры для исследования и оперативного контроля окружающей среды / С.Б. Петров, А.П. Смирнов // Оптический журнал. – 2000. – №15. – С.82-93.
203. Горбунов Г.Г. Фурье-спектроскопия: состояние и тенденции развития / Г.Г. Горбунов // Оптический журнал. – 1993. – №12. – С. 3 – 6.
204. Тягур В.М. Математична модель функціонування статичного зображуючого фур'є-спектрометра дистанційного зондування Землі / Д.В. Поздняков, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С. 53–55.
205. Тягур В.М. Математичне моделювання зображувального Фур'є-спектрометра статичного типу для дистанційного зондування Землі / В.

- М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XIV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2015. – С.71.
206. Тягур В.М. Метод калибровки угловых параметров ОЭП / В.М.Тягур, Т.И. Гураль, Т.Н. Генсницкая, Н.И., П.В. Соболев // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С.52–53.
207. Тягур В.М. Метод калибровки угловых параметров сканеров дистанционного зондирования Земли / В.М.Тягур, Т.Н. Генсницкая, Т.И. Гураль // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2019. – №1. – С.44–51.
208. Панфилов А.С. Качество радиометрических данных оптической аппаратуры наблюдения Земли и построение российской системы обеспечения единства радиометрических измерений этой аппаратурой / А.С. Панфилов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 20012. – Т.9. – №2. – С. 152–159.
209. Міхеєнко Л.А. Радіометричне калібрування прецизійних оптико – електронних зондуючих систем космічного базування // дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. – 2013.
210. Зельк Я.И. Информационно-технологическая поддержка послестартовой калибровки оптико-электронных сенсоров наблюдения космической системы «Сич» / Я. И. Зельк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 5/9 (65). – С. 56–61.
211. ГОСТ 8.195-89 «Государственная поверочная схема для средств измерения спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,25...25,00 мкм; силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2...25,00 мкм”.

212. Вариченко Л.В. Методы и средства измерения энергетических характеристик оптик-электронных систем космического зондирования Земли / Л.В. Вариченко, В.Г. Колобродов, В.И. Микитенко, Л.А. Михеенко // Космічна наука і технологія. – 2006. – Т.12. – №2/3. – С. 59–69.
213. Зюмних А.А. Многоканальный спектрометр МКС-М. Лабораторные исследования, калибровка и проверка ее сохранности в полете / А.А. Зюмних // Исследование Земли из космоса. – 1989. – № 2. – С. 71–77.
214. Богданов А.А. Стенд для энергетической градуировки радиометров в диапазоне длин волн 0,35...2,5 мкм / А.А. Богданов, Л.Н. Самойлов, В.И. Саприцкий, Т.А. Тыннисон // Тарту: ТАО им. Струве. – 1980. – 28 с.
215. Аванесов Г.А. Метрологическое обеспечение яркости Земной поверхности многоканальной сканирующей системой "Фрагмент" / Г.А. Аванесов, Я.Л. Зиман, А.Г. Сычёв, В.И. Тарнопольский // Исследование Земли из космоса. – 1981. – №5. – С. 65–77.
216. Аванесов Г.А. Методика и аппаратура радиометрической градуировки в абсолютных энергетических единицах многозональной сканирующей системы "Фрагмент" / Г.А. Аванесов, А.А. Богданов, А.П. Наумов, А.Г. Сычёв, В.И. Тарнопольский, Г.Н. Толстых // Исследование Земли из космоса. – №6. – 1981. – С. 79–88.
217. Мухомедяров Р.Д. Метрологическая аттестация многоспектрального сканирующего устройства высокого разрешения / Р.Д. Мухомедяров, А.С. Глушков, А.С. Михайлов, Р.Ш. Хисамов Р.Ш. // Исследование Земли из космоса. – 1991. – №1. – С. 64–74.
218. Киселёв И.А. Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ, "Ресурс - 01" / И.А. Киселёв, А.Н. Коростелёв, М.К. Параев, А.С. Панфилов, А.Д. Романов // Исследование Земли из космоса. – 1991. – №2. – С. 34–43.

219. Атрашевский Ю.И. Метрологический комплекс для аттестации видеоспектральной аппаратуры дистанционного зондирования в диапазоне 0,35...2,5 мкм / Ю.И. Атрашевский, Б.И. Беляев, В.Г. Соколов // 11-я научно-техническая конференция "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов". – 1997. – С. 11.
220. Колобродов В.Г. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування / В.Г. Колобродов, В.И. Микитенко, Л.А. Міхеєнко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2003. – №3. – С. 98–104.
221. Тиходеев П.М. Световые измерения в светотехнике (фотометрия), 2-е издание / П.М. Тиходеев // Госэнергоиздат, 1962. – 334 с.
222. Колобродов В.Г. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери / В.Г. Колобродов, В.И. Микитенко, Л.А. Міхеєнко, Л.А. Петрушенко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2005. – №4. – С. 106–114.
223. Гуревич М.М. Введение в фотометрию / М.М. Гуревич // Энергия, Ленинградское отделение. – 1968. – С. 174.
224. Панфилов А.С. Обеспечение абсолютных радиометрических измерений с помощью космических датчиков изображений видимого и ближнего ИК - диапазона длин волн / А.С. Панфилов, Б.Е. Лисянский, С.П. Морозова // Исследование Земли из космоса . – 2006. – № 1. – С. 41–44.
225. Панфилов А.С. Оценка точности предполётной радиометрической калибровки оптико-электронной съёмочной аппаратуры видимого и ближнего ИК - диапазонов спектра / А.С. Панфилов, И.А. Гладкова // Исследования Земли из космоса. – 2003. – №5. – С. 43– 50.
226. Панфилов А.С. Метрологические аспекты измерений оптических характеристик системы "Поверхность Земли - Атмосфера" по

- результатам съёмки из космоса / А.С. Панфилов // Исследования Земли из космоса. – 2002. – № 5. – С. 15–21.
227. Холопов Г.К. О нормировании чувствительности радиометров / Г.К. Холопов Г.К., Ю.А. Шуба // Оптико-механическая промышленность. – 1977. – № 10. – С. 6–8.
228. Холопов Г.К. Нормирование чувствительности радиометрической аппаратуры для исследования природных ресурсов Земли / Г.К. Холопов, Р.Ш. Хисамов, Ф.Г. Хузин // Исследование Земли из космоса. – 1984. – № 4. – С. 81–88.
229. Богданов А.А. О возможном повышении спектрорадиометрической точности при дистанционных исследованиях Земли с помощью многозональных съёмочных систем / А.А. Богданов, В.Н. Налимов, А.Г. Сычёв // Исследование Земли из космоса. – 1981. – №3. – С. 77–84.
230. Гогохия В.В. Методы восстановления спектральной плотности энергетической яркости природных объектов по интегральным измерениям / В.В. Гогохия // Исследования Земли из космоса. – 1982. – №6 – С. 95–103.
231. Панфилов А.С. Качество радиометрических данных оптической аппаратуры наблюдения Земли и построение российской системы обеспечения единства радиометрических измерений этой аппаратурой / А.С. Панфилов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т.9. – №2. – С. 152–159.
232. Аксютлов Л.Н. Методы измерения нелинейности приёмников излучения / Л. Н. Аксютлов, Г.К. Холопов // Оптико-механическая промышленность. – 1973. – №10. – С. 42 – 47.
233. Михеенко Л.А. Метрологическое обеспечение радиометрической калибровки оптико-электронных устройств дистанционного зондирования Земли / Л. А. Михеенко, В. Н. Боровицкий // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15. – № 5. – С. 3–15.

234. ОСТ 3-4205-79 Объективы диапроекторные. Метод измерения коэффициента рассеяния.
235. ГОСТ 3840-79 Объективы кинопроекторные. Технические условия.
236. ОСТ 3-3210-75 Приборы телескопические. Метод измерения коэффициента пропускания и рассеяния.
237. ОСТ ВЗ-4774-80 Объективы для изделий общей техники. Методы измерения коэффициента рассеяния.
238. ГОСТ 24724-81 Объективы для кино- и фотоаппаратов. Метод определения коэффициента рассеяния.
239. <http://www.niiki.ru/pages/n-k-isp-opt.html>
240. Тягур В.М. Новый метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Український метрологічний журнал. – 2013. – Вип. 3. – С. 27–32.
241. Гуревич М.М. Введение в фотометрию / М.М. Гуревич. – Энергия, Ленинградское отделение. – 1968. – 244 с.
242. Апенко М.И. Физическая оптика / М.И. Апенко, Н.П. Гвоздева. – М., Машиностроение. – 1979. – 216.
243. Тягур В.М. Установка для визначення, у відповідності з новим методом, коефіцієнту розсіювання об'єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 56–57.
244. Тягур В.М. Новый метод визначення коефіцієнту розсіювання об'єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт М.І. // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 55–56.

245. ГОСТ 8.207-76 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
246. Гутуров М.М. Основы светотехники / М.М. Гутуров. – М.: Энергия. – 1968. – 392 с.
247. ГОСТ 8.401-80 Классы точности средств измерений. Общие требования.
248. Тягур В.М. Удосконалення установки для визначення по новому методу коефіцієнту розсіювання об'єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 58–59.
249. Пат. 103242 Україна, МКВ G01M 11/02, G02B 13/00. Пристрій для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів та виробів на їх основі і спосіб його використання / Тягур В.М., Камінський С.Ф., Лихоліт М.І. – Опубл. 2013, Бюл. №11.
250. Тягур В.М. Установка для вимірювання коефіцієнта розсіювання об'єктів у відповідності з новим методом його визначення / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Український метрологічний журнал. – 2014. – Вип. 1. – С. 26–34.
251. Тягур В.М. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2017. – №2. – С.89–96.
252. Маламед Е.Р. Конструкция главных зеркал космических телескопов / Е.Р. Маламед, Ю.Н. Петров, И.В. Соколов // Оптический журнал – 2002. – Т. 69 – №9. – С. 26–30.
253. Любарский С.В. Оптические зеркала из нетрадиционных материалов / С.В. Любарский, Ю.П. Химич // Оптический журнал. – 1994. – № 1. – С. 76–83.

254. Мирошников М.М. Зеркала оптических телескопов / М.М. Мирошников, С.В. Любарский, Ю.П. Химич // Оптический журнал. – 1990. – № 9. – С. 3–18.
255. Vukobratovich D. Lightweight Mirror Design / D. Vukobratovich, A. Ahmad, Ed. // Optomechanical Engineering Handbook. – 1999. – Boca Raton: CRC Press LLC. – 848 с.
256. Савицкий А.М. Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов / А.М. Савицкий, И.М. Соколов // Оптический журнал. – 2009. – **76**, № 10. – С. 94–98.
257. Абдулкадыров М.А. Оптимизация конструкции и технологические возможности изготовления облегченных астрономических и космических зеркал М.А. Абдулкадыров, Н.М. Владимиров, Н.С. Добриков, В.Е. Патрикеев, А.П. Семенов // Оптический журнал. – 2016. – Т.83, № 3. – С. 39– 4.
258. Тягур В.М. Моделювання полегшення дзеркал оптичної системи космічного базування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2016. – С.35-36. // Збірник тез доповідей XV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2016. – С. 36–37.
259. Тягур В.М. Аналіз впливу полегшення дзеркал для сканерів ДЗЗ на деформацію їх оптичної поверхні / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 218.
260. Тягур В.М. Анализ влияния деформаций оптических поверхностей на качество изображения в сканерах ДЗЗ/В.М. Тягур, К.А. Нгуен, В.М. Сокурченко // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 209.

261. Tiagur V. Development of software for combining finite element and optical analyses / V. Tiagur, V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – №4/9 (88). – С.46–53.
262. Storn R. Differential Evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces” / R. Storn R. and K. Price // Journal of Global Optimization. – 1997. – Vol. 4. – No. 11. – P. 341–359.
263. Тягур В.М. Полегшення осесиметричних великогабаритних дзеркал для ДЗЗ / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Тези доповідей конференції «17 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2017. – С. 208.
264. Тягур В.М. Облегчение крупногабаритных зеркал и методы их крепления / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Сборник тезисов докладов 6-й Международной конференции «Космические технологии: Настоящее и будущее». – Днепр. – 2017. – С. 80.
265. Tyagur V.M. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution / Tyagur V.M., Lyalko, Popov V.A., Stankevich S.A., Shklayr S.V., Podorva N.V., Likholt N.I., C.V. Dobrovolska C.V. // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2014. – Vol. 12. – No. 2 – P.153–164.
266. Тягур В.М. Експериментальні дослідження мінімальної роздільної різниці температур тепловізійної камери із субпіксельною обробкою зображень / К.В. Добровольська, М. І. Лихоліт, В. М. Тягур // Тезисы докладов на XVI Международной молодежной научно-практической конференции «Человек и космос». – Днепропетровск. – 2014. – С. 128–129.
267. Тягур В. М. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень ІЧ камери ДЗЗ та експериментальні дослідження підвищення просторової роздільної здатності / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.І. Лихоліт, К.В.

Добровольська та інші // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СІБ «Арсенал». – 2014. – С. 47–50.

ДОДАТОК А

Порівняльна таблиця характеристик сканерів дистанційного зондування Землі надвисокого просторового розрізнення (висота орбіти – 681 км)

Назва КА	Панхроматичний			Спектральний			Оптична система							
	P, (м)	L, (км)	$\Delta\lambda$, мкм	P, (м)	L, (км)	$\Delta\lambda$, мкм	Тип	f'_o , (мм)	$\varnothing_{\text{ВХ.ЗР}}$, мм	F/#	ν_H , мм ⁻¹	p (мкм)	Габа- рити (см)	Вага ОЕС, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IKONOS-2	0,817	11	0,45-0,90	3,27	11	0,45-0,53; 0,52-0,61; 0,64-0,72; 0,77-0,88;	Корш	10000	700	14,3	42	12	Ø80× 153	171
Quickbird-2	0,93	25	0,45-0,90	3,71	25	0,45-0,52; 0,52-0,60; 0,63-0,69; 0,76-0,90;	ТМА	8800	600	14,7	42	12	115× 141× 195	380
OrbView-3	1,44	11,6	0,45-0,90	5,8	11,6	0,45-0,52; 0,52-0,60; 0,63-0,69; 0,76-0,90;	Корш	3000	450	6,7	83	6×5,4		66
OrbView-5	0,41	15,2	0,45-0,90	1,64	15,2	0,45-0,52; 0,52-0,60; 0,63-0,69; 0,76-0,90;	Корш	13350	1100	12,14	63	8	Ø150× 300	452

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
World View-1	0,68	25	0,45-0,90	-	-	-	ТМА	7800	600	13	63	8	115×141 ×195	380
World View-2	0,41	14,6	0,45-0,90	1,6	15,2	0,45-0,52; 0,52-0,59; 0,63-0,69; 0,76-0,89;	Корш	13350	1100	12,14	63	8	Ø150× 300	452
						0,42-0,45; 0,5-0,64; 0,7-0,73; 0,9-1,05;								
Eros-B	0,94	9,4	0,50-0,90	-	-	-	Ритчи- Крет.	5050	505	10	71	7	-	-
CartoSat-2	0,85	9,6	0,45-0,85	-	-	-	Ритчи- Крет.	5600	700	8	71	7	Ø76× 160	120
Kompsat-2	1	15	0,50-0,90	4	20,5	0,45-0,52; 0,52-0,60; 0,63-0,69; 0,76-0,90;	Ритчи- Крет.	9000 (пан) 2250 (МС)	600 600	15 3,75	38 38	13 13	-	75
Kompsat-3	0,7	15	0,45-0,9	2,8	15	0,45-0,52; 0,52-0,6; 0,63-0,69; 0,76-0,9;	Корш	8600	750	11,5	57	8,75	Ø130× 210	80
Ресурс- ДК	1,53	55	0,58-0,80	3-4	55	0,50-0,60; 0,60-0,70; 0,70-0,80;	Линзо в	4000	500	8	56	9	-	310

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pleiades	0,7	20	0,50-0,90	2,8	20	0,45-0,52; 0,52-0,60; 0,63-0,69;	Корш	12900	650	19,8	38	13	160×98× 224	195
ASNARO	0,68	13,5	0,45- 0,90;	2,7	13,5	6 каналів	Корш	-	-	-	-	-	-	97
ALOS-3	0,88	55	0,52- 0,77;	-	-	-	ТМА	6200	-	-	-	-	-	-
Gaofen-2	0,87	22,5	0,45-0,9;	3,48	22,5	0,45-0,52; 0,52-0,59; 0,63-0,69; 0,71-0,89;	Корш	7800	520	15		10	Ø70× 100	150
DubaiSat- 2	1,14	13,5	0,55-0,9;	4,56	13,5	0,45-0,52; 0,52-0,59; 0,63-0,69; 0,77-0,89;	Корш 4-х дзерк.	5750	400	14,25	53	9,5	-	50
Deimos-2	1,14	13,5	0,55-0,9;	4,56	13,5	0,45-0,52; 0,52-0,59; 0,63-0,69; 0,77-0,89;	Корш 4-х дзерк.	5750	400	14,25	53	9,5	-	50
SkySat-3	0,9	8	0,45-0,9;	2	8	0,45-0,52; 0,52-0,59; 0,61-0,69; 0,74-0,9;	Ритчи- Крет.	3600	-	-	77	6,5	-	-

ДОДАТОК Б

Порівняльна таблиця супутників з інфрачервоними сканерами

Супутник	Висот а орбіти (км)	Сканер	Спектральний діапазон (мкм)	NETD (К)	Абсол. темп. розді лення	Просторов е розділення (м)	Смуга захвату (км)	Приймач	Призначення					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
TERRA	705	ASTER TIR	8.125 – 8.475	0,2-0,3	1-3 від Т°	90	60	5 лінійок Hgсdte 10 пікселів Охолоджена 80° К						
			8.475 – 8.825											
			8.925 – 9.275											
			10.25 - 10.95											
			10.95 - 11.65											
		MODIS	3.660 - 3.840	0.05	1000	2330	Hgсdte Охолоджена 80° К		Температура поверхні, хмар					
			3.929 - 3.989	2.0					Температура атмосфери					
			3.929 - 3.989	0.07					Пір'ясті хмари, Водяні пари					
			4.020 - 4.080	0.07										
			4.433 - 4.598	0.25					Озон					
			4.482 - 4.549											
			1.360 - 1.390	0.25									Температура поверхні, хмар	
			6.535- 6.895											
			7.175 – 7.475											
			8.400 – 8.700											
			9.580 – 9.880	0.25										Верхня
			10.78 -11.28	0.05										
			11.77 -12.27											
			13.185 -	0.25										

			13.485 13.485 - 13.785 13.785 - 14.085						границя хмарності
			14.085 - 14.385	0.35					
BIRD	450	MWIR	3.4-4.2	-	-	290	148		Исслед. пожеж рослинності; вулканічна активність
		LWIR	8.5-9.3	-		290	148	2 лінійки HgCdTe 80° К 512 пиксел.	
Landsat 7	705	ETM+	10.4 – 12.5	-		60	185	HgCdTe 6 пікселів	Стан окруж. середовища
METEOR M	830	MSU-MR	1.6-1.8 3.5-4.1 10.5-11.5 11.5-12.5	-		1000	3000		Метеорологія
ELECTR O	35600	MSU-GS	0.5-0.65 0.65-0.8 0.8-0.9	-		1000	20°×20°		Метеорологія
			3.5-4.0 5.7-7.0 7.5-8.5 9.2-10.2 10.2-11.2 11.2-12.5	0,1-0,2		4000			

1	2	3	4	5		6	7		8
NOAA	849	AVHRR	0.58-0.68 0.725-1.0 1.58-1.64 3.55-3.93 10.3-11.3 11.4-12.4	0,12	0,5-1,4	1100	3000		Метеорологія Хмари вночі Темпер. морів
SAC-D	657	NIRST	3.4-4.2 10.4-11.3 11.4-12.3	-		351	182	Болометрич. лінійки	Високотемпера турні об'єкти пожежі, вулкани
MOMS-1	9000	VTIR	0.5-0.7			900	1500		
			6.0-7.0 10.5-11.5 11.5-12.5			2700	1500		Хмарність, температура океану
CBERS 3, CBERS 4	778	IR-MSS	0.5-1.1 1.55-1.75 2.08-2.35			80	120		
			10.4 – 12.5	1.2		160	120		
FY-1A, FY-1B	900	-	10.5–12.5	0.25	1	1100	3100	HgCdTe 100° K	
FY-1C, FY-1D	870	-	3.55-3.93 10.3-11.3 11.5-12.5	0.27	1-2	1100	3100	HgCdTe 100° K	

1	2	3	4	5		6	7		8
Nimbus-7	955	CZCS	10.5 - 12.50	-		825	1566		Температура поверхні
HJ-1B	649	-	3.5-3.9	-		150	720		Моніторинг навколишнього середовища; рослинність
			10.5 - 12.5	-		300	720		
ALOS-2	600	CIRS	8.0-12.0	0,2		200	128×96	Болом. Матр 640×480	
CALIPSO		IIR	8.5-9.3 10.1-10.9 11.6-12.4	0.5	1	90 мрад		Болом. Матр 64×64	

ДОДАТОК В

Залежність необхідного діаметра світлової апертури об'єктива D_p від просторового розділення

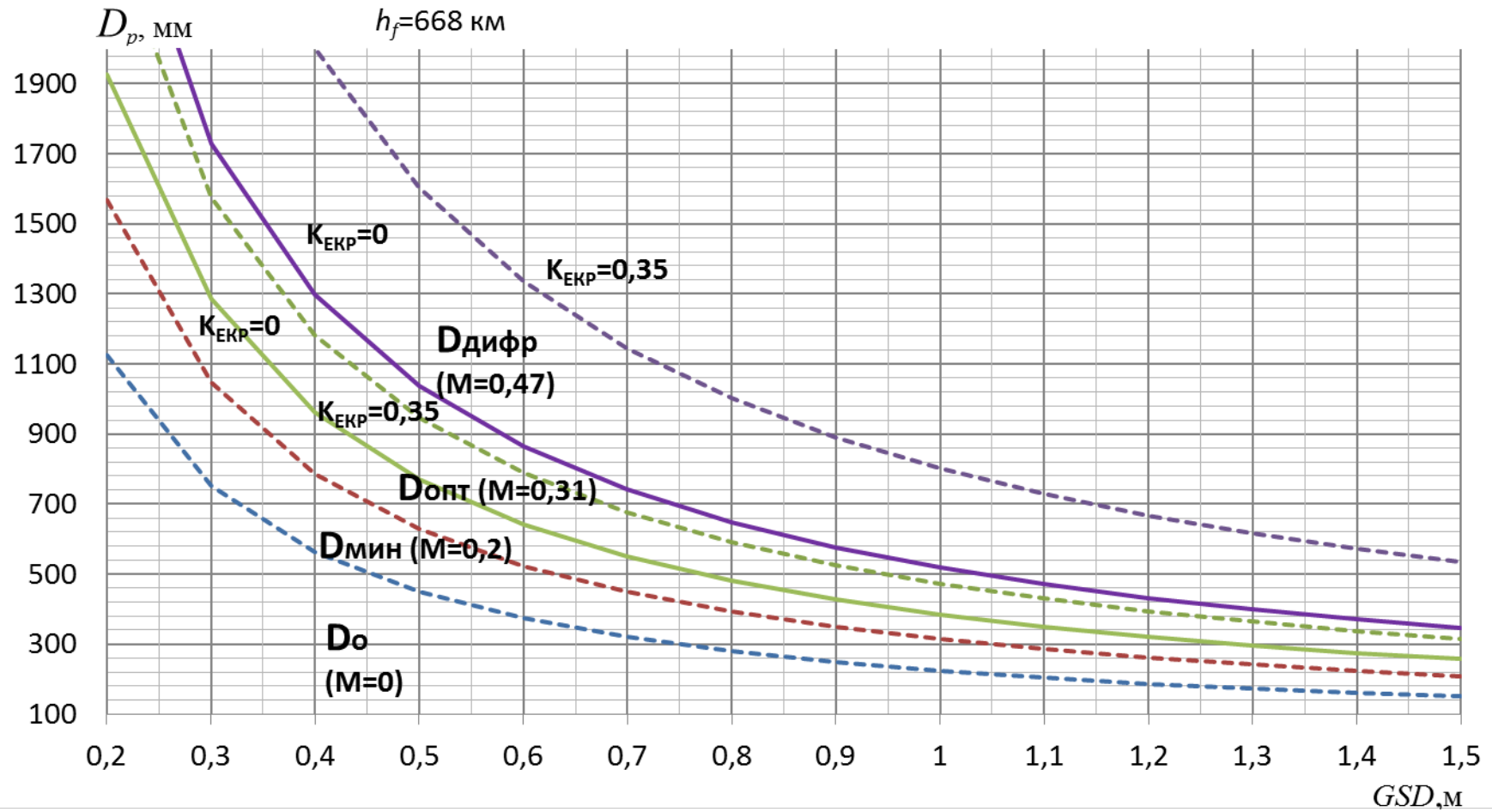


Рис. ДВ,1. Залежність необхідного діаметра світлової апертури об'єктива D_p від просторового розділення GSD

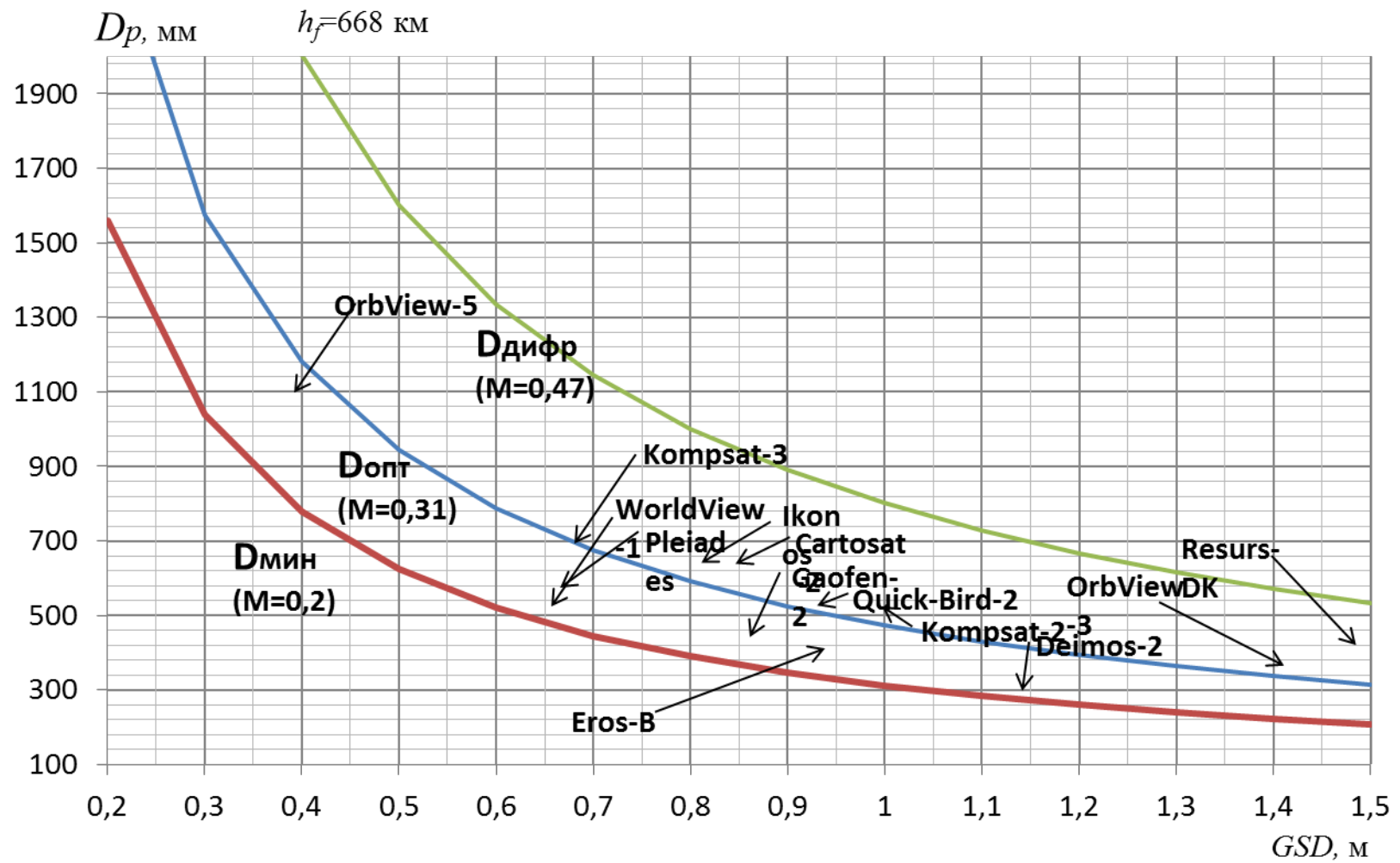


Рис. ДВ,2. Залежність діаметра апертури об'єктива D_p від просторового розділення GSD у існуючих систем ДЗЗ

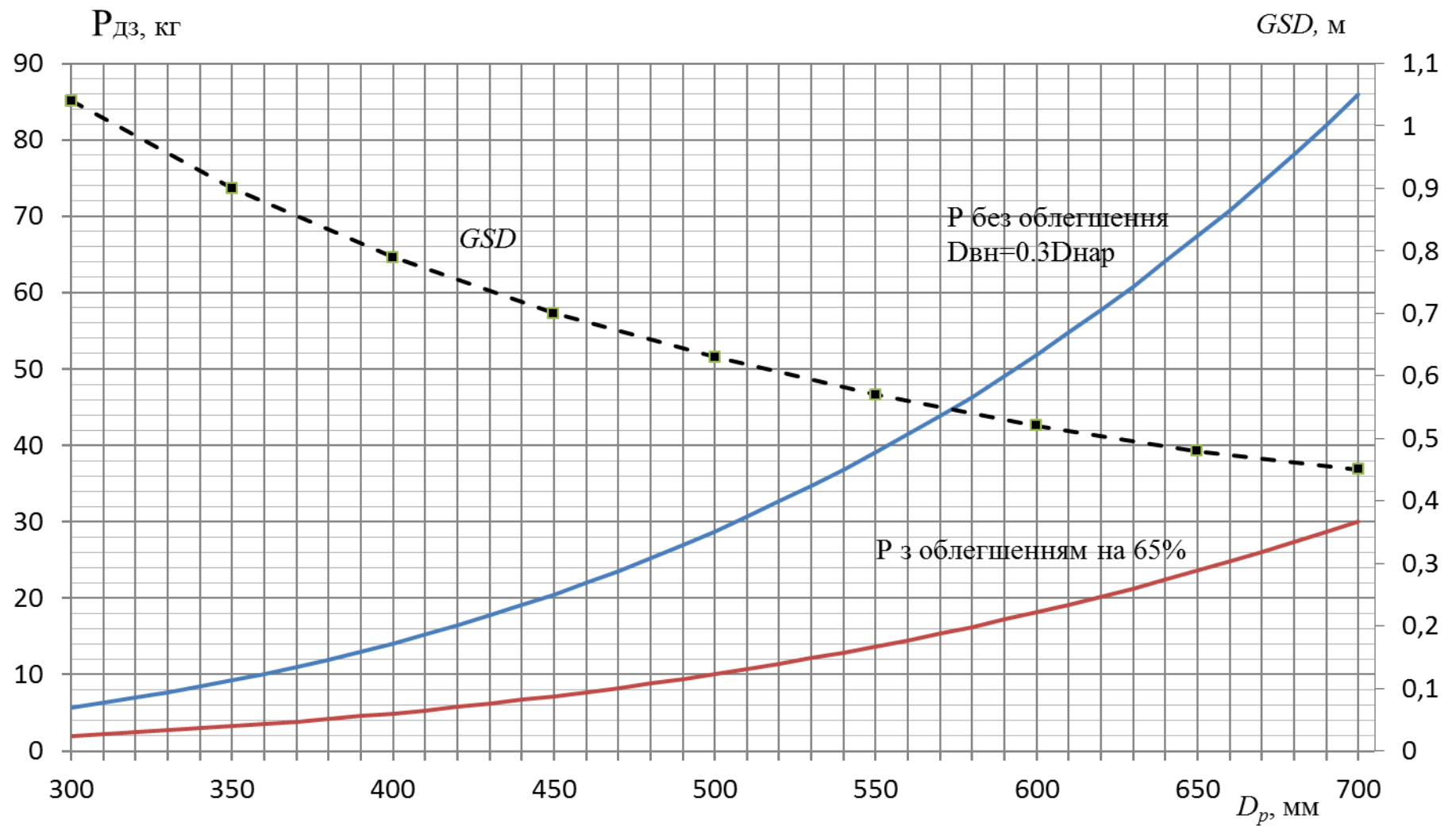


Рис. ДВ,3. Залежність ваги дзеркала P_{dz} від діаметра D_p і необхідного просторового розділення GSD

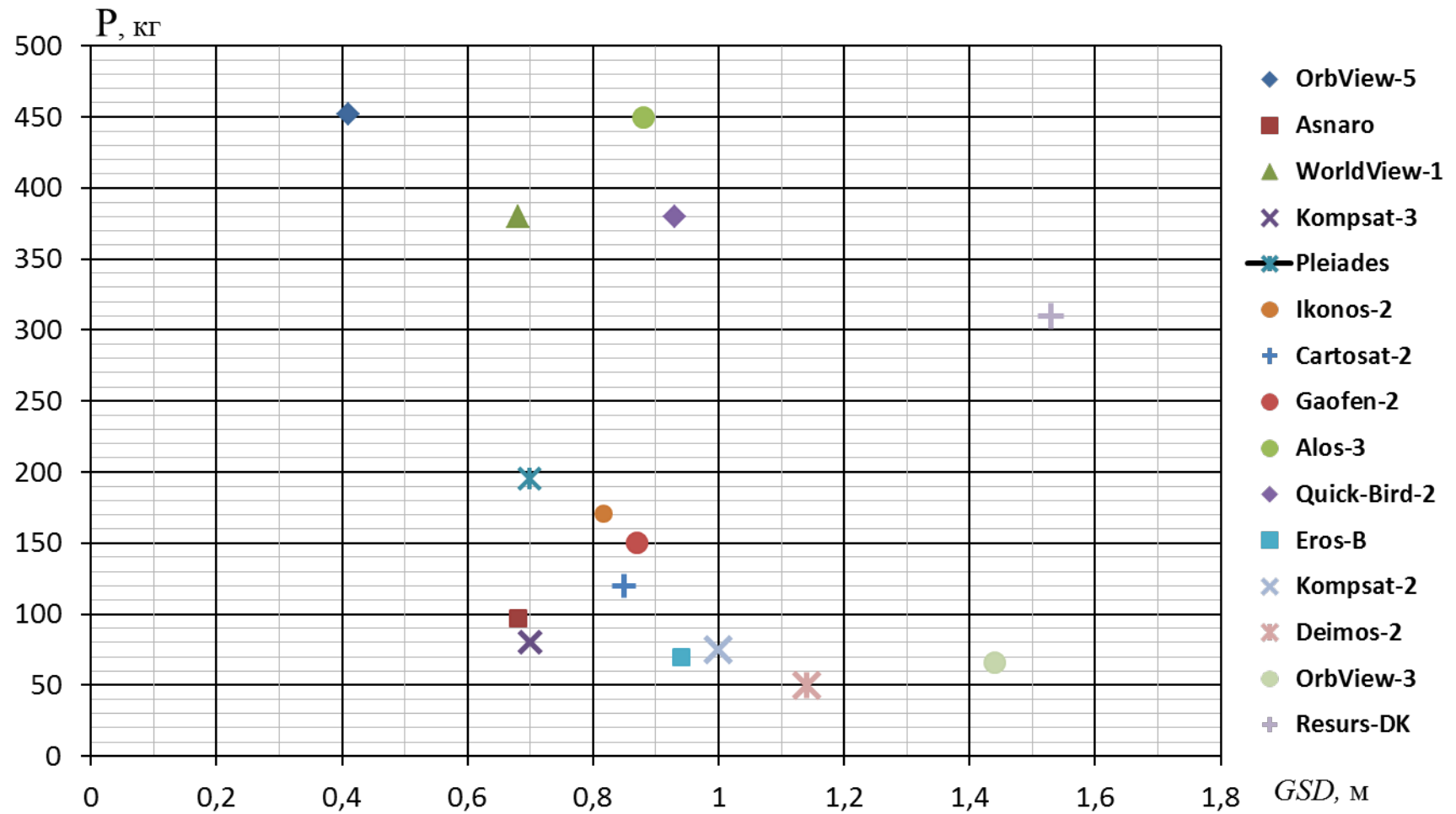


Рис. ДВ,4. Вага існуючих сканерів в залежності від просторового розділення GSD

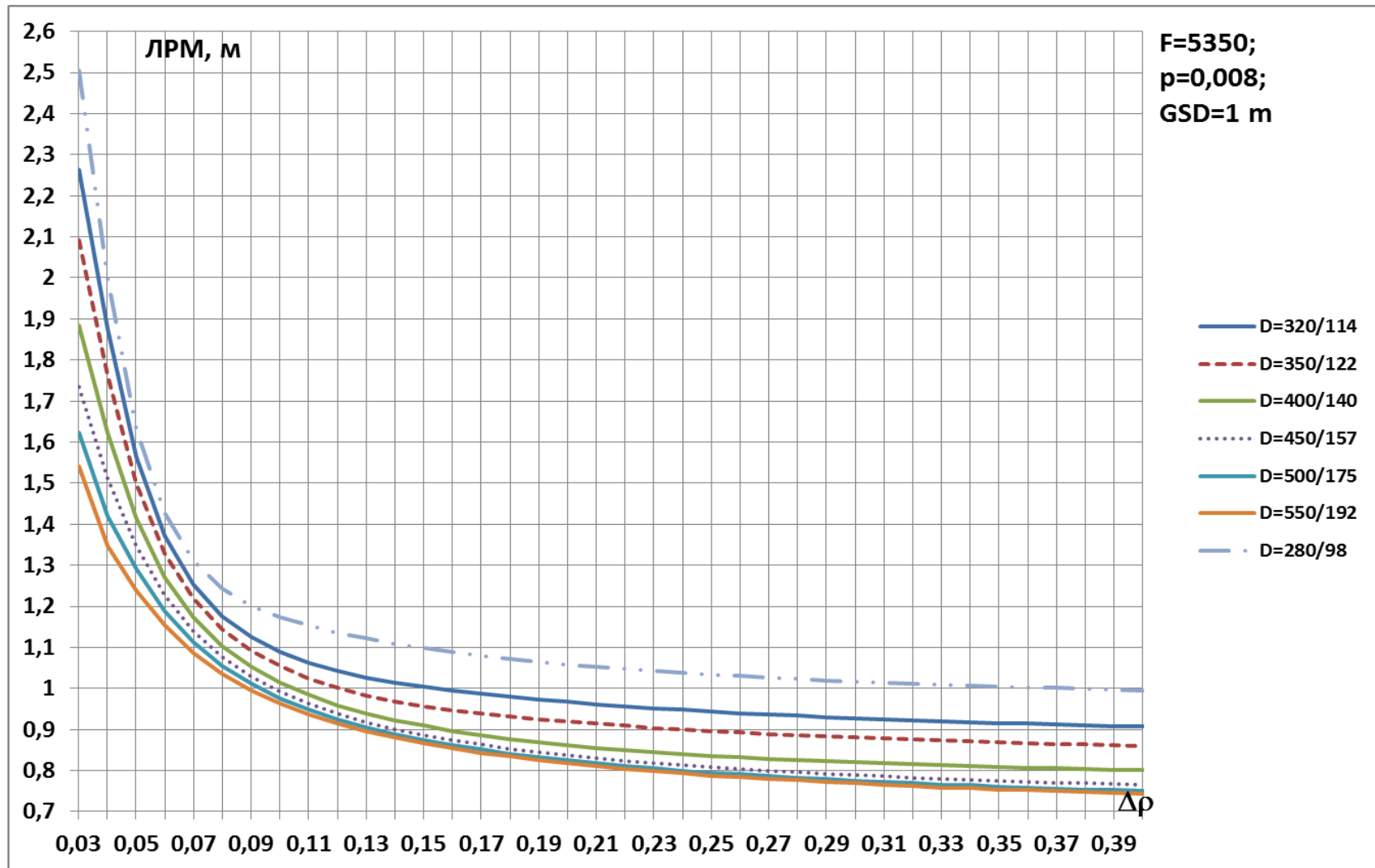


Рис. ДВ,5. Криві ЛРМ при різних діаметрах світлової апертури

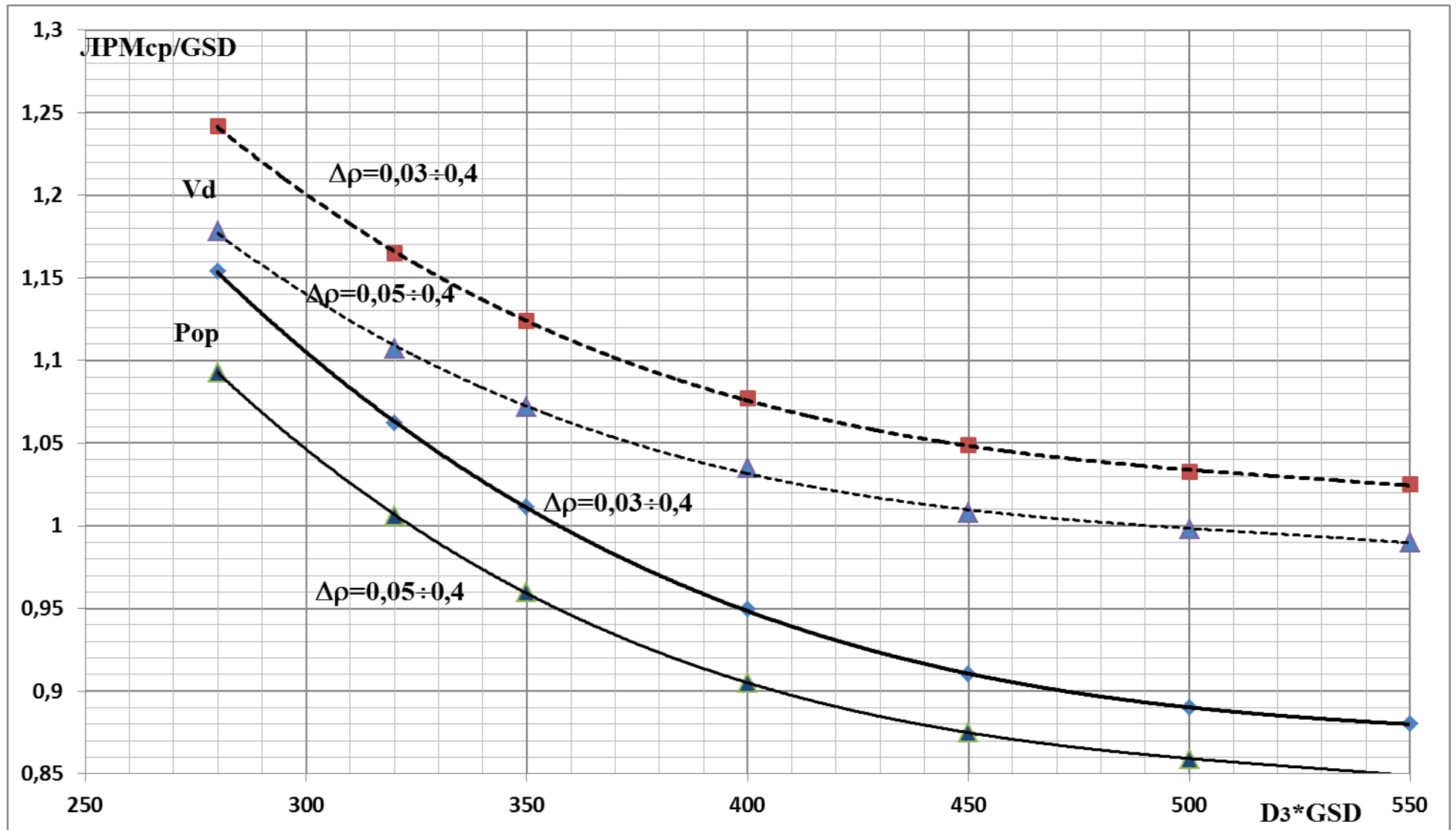


Рис. ДВ,6. Залежність LPM_{cp} від діаметра дзеркала

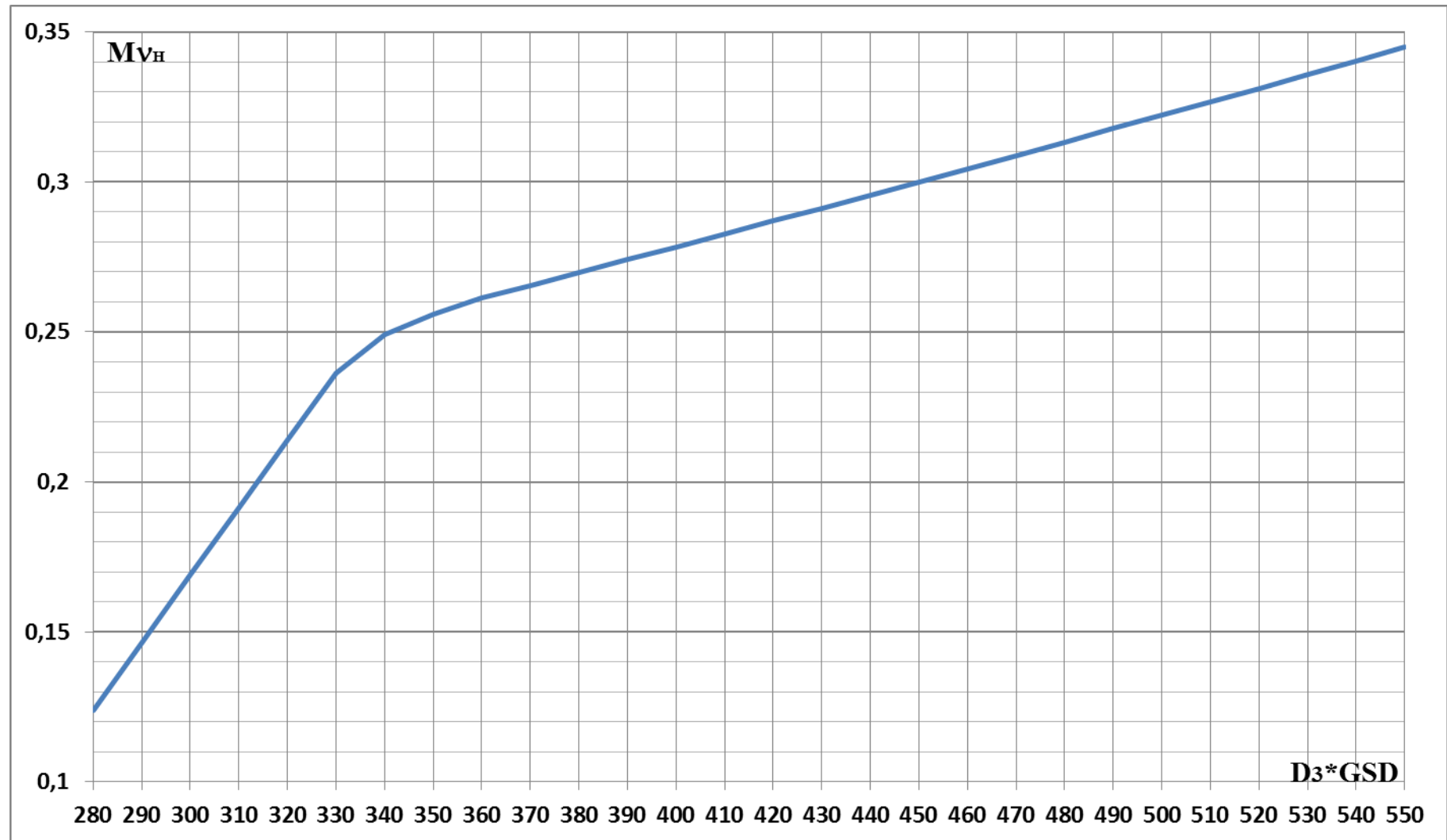


Рис. ДВ,7. Залежність МПФ на частоті Найквіста від діаметра дзеркала та величини проекції пікселя

Додаток Г
Модуляційні передавальні функції сканера

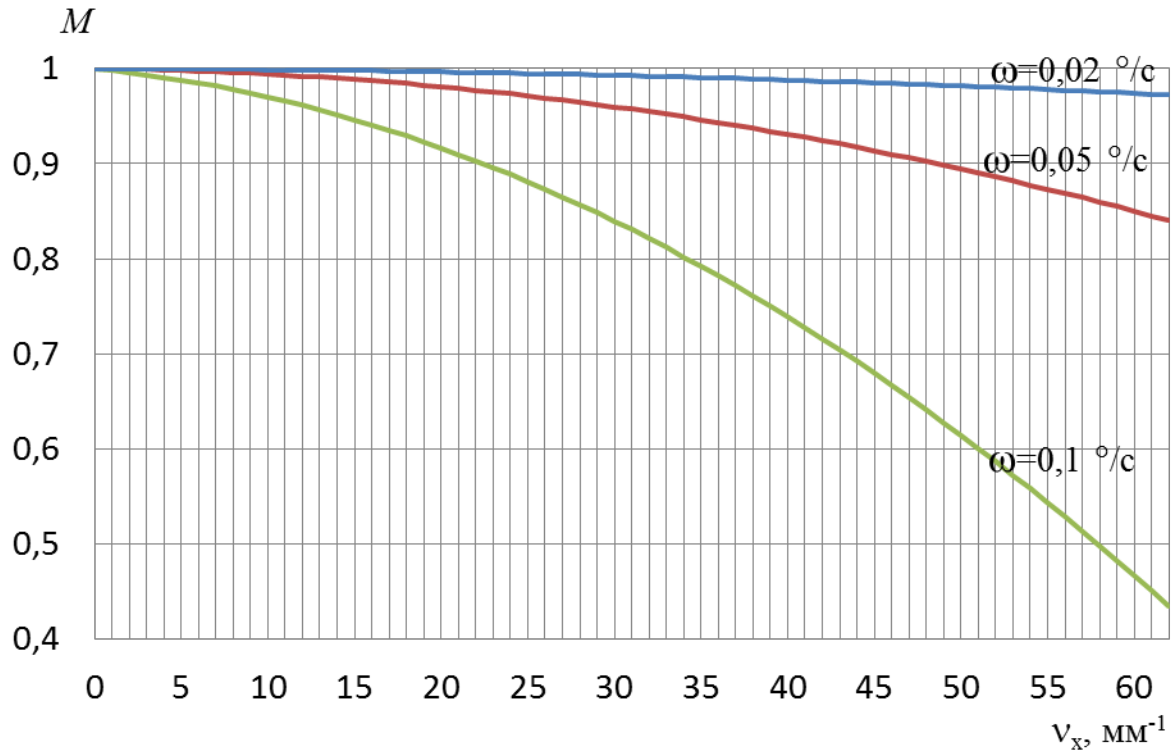


Рис. ДГ,1. МПФ нестабільності осі КА для СВРЗ

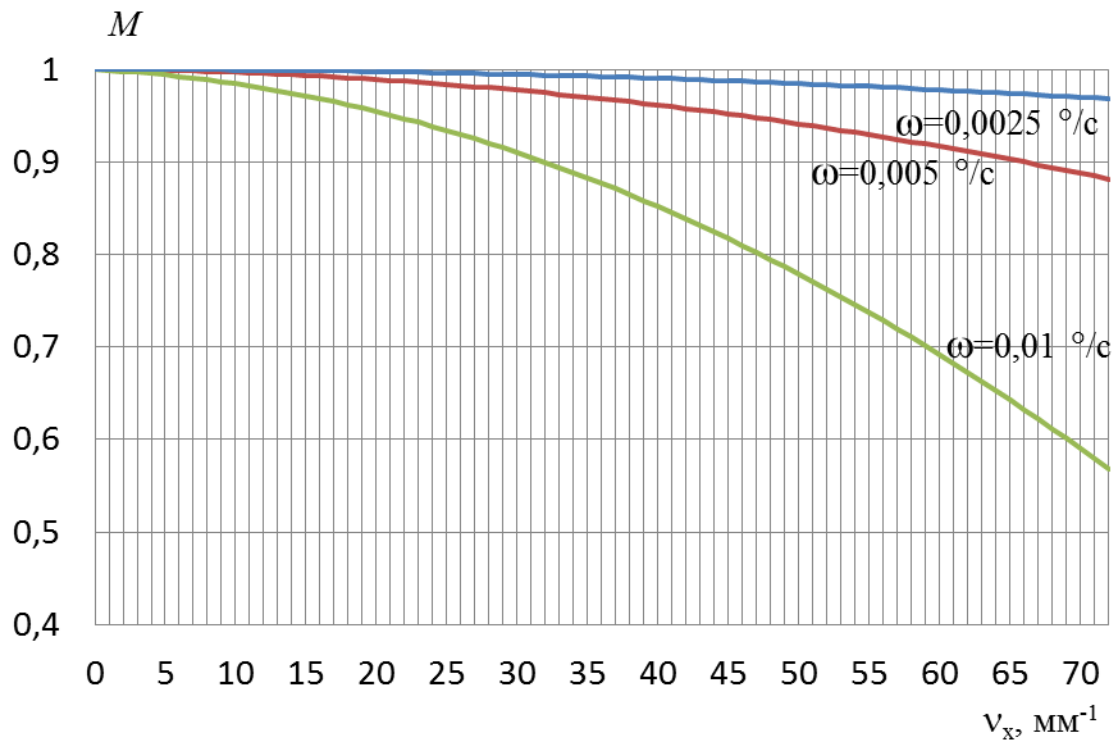


Рис. ДГ,2. МПФ нестабільності осі КА для СНВРЗ

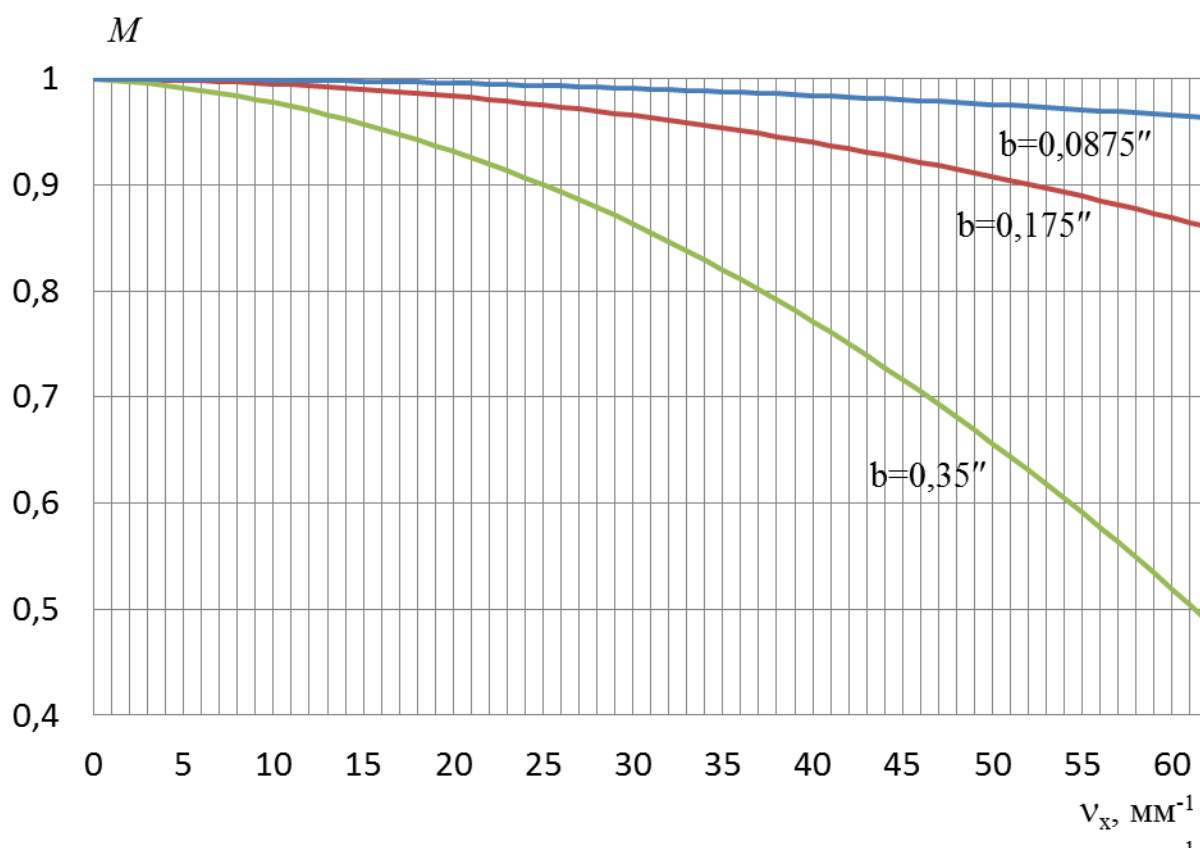


Рис. ДГ,3. МПФ вібрації для СВРЗ

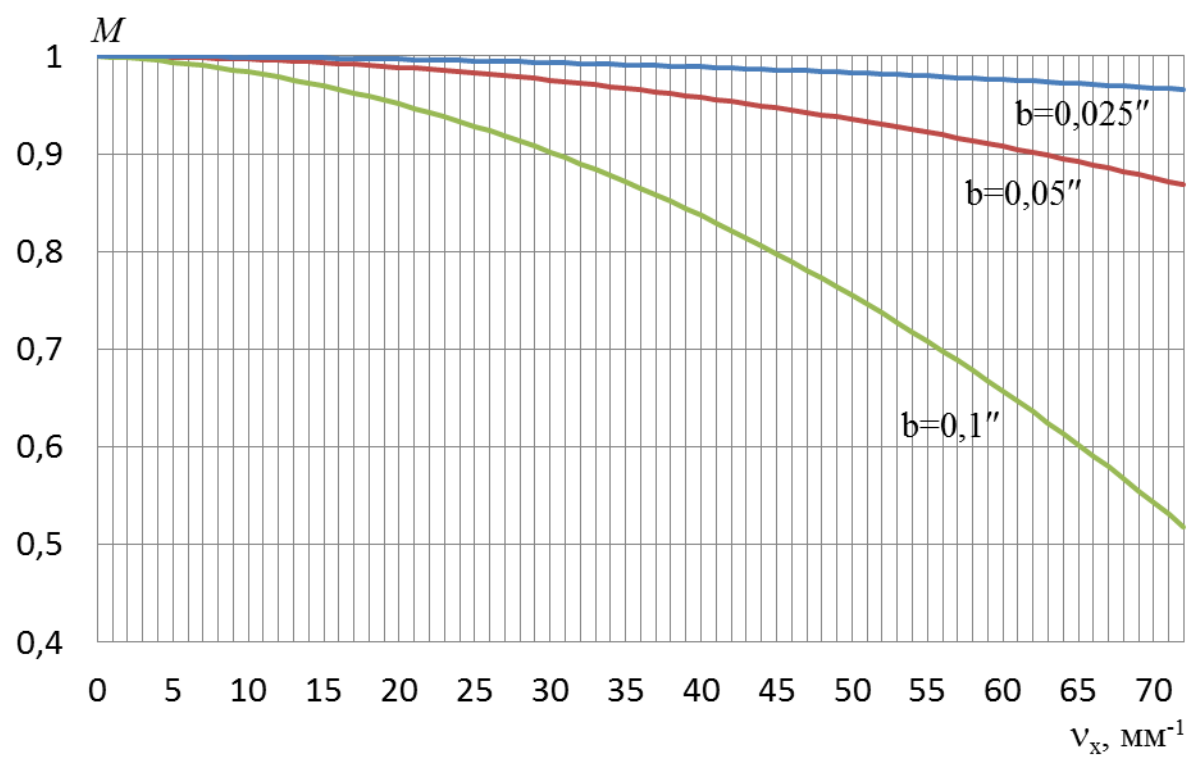


Рис. ДГ,4. МПФ вібрації для СНВРЗ

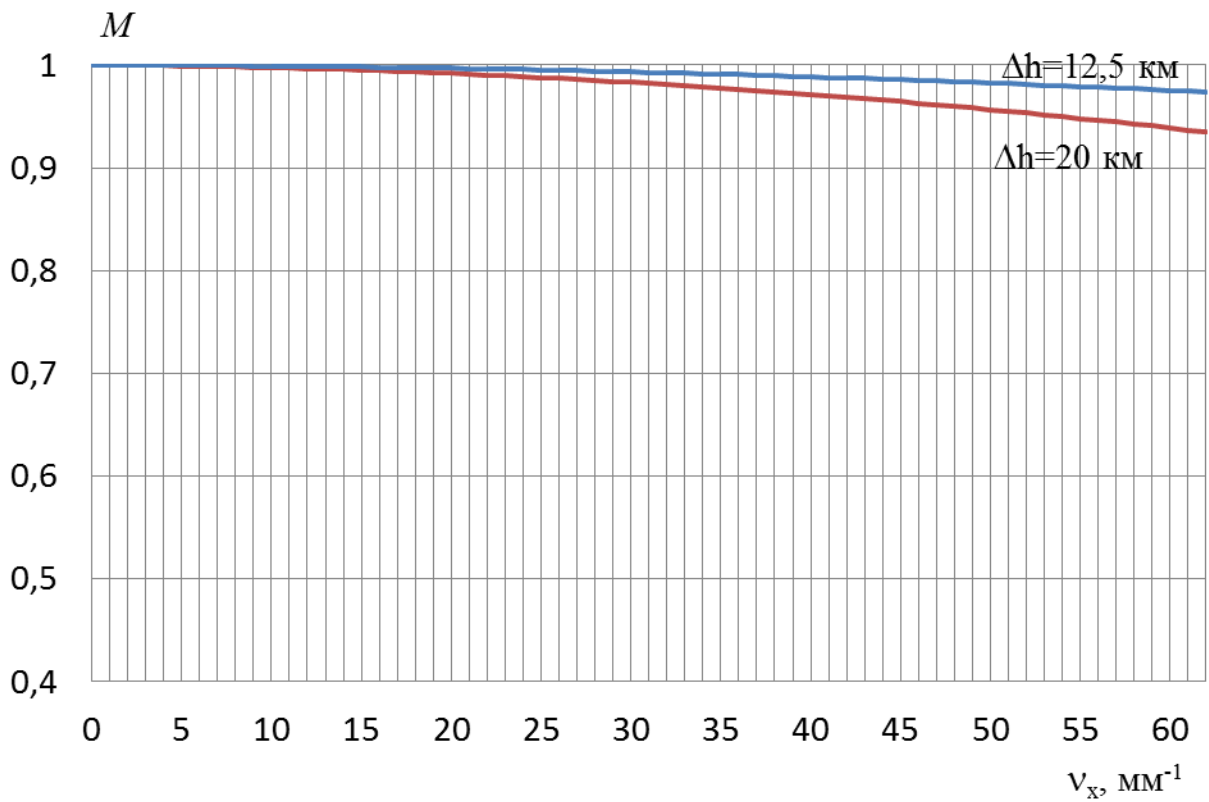


Рис. ДГ,5. МПФ нестабільності висоти для СВРЗ

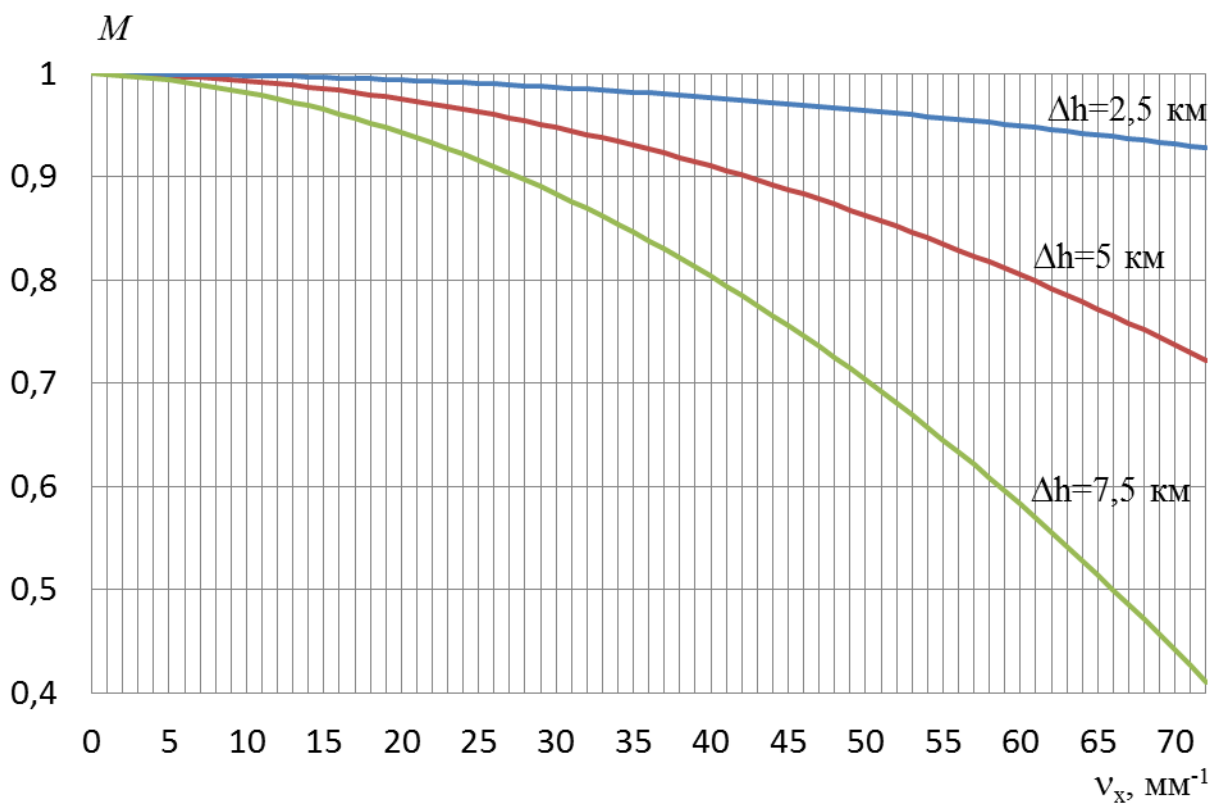


Рис. ДГ,6. МПФ нестабільності висоти для СНВРЗ

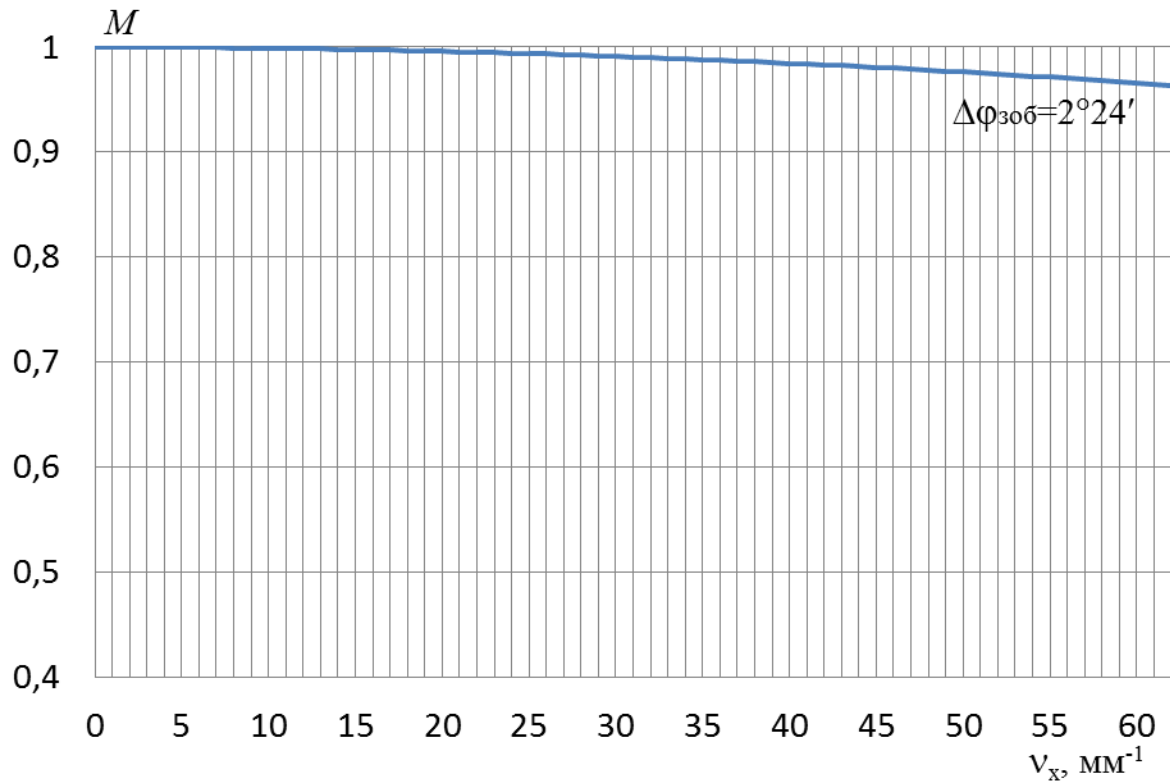


Рис. ДГ,7. МПФ за рахунок обертання Землі для СВРЗ

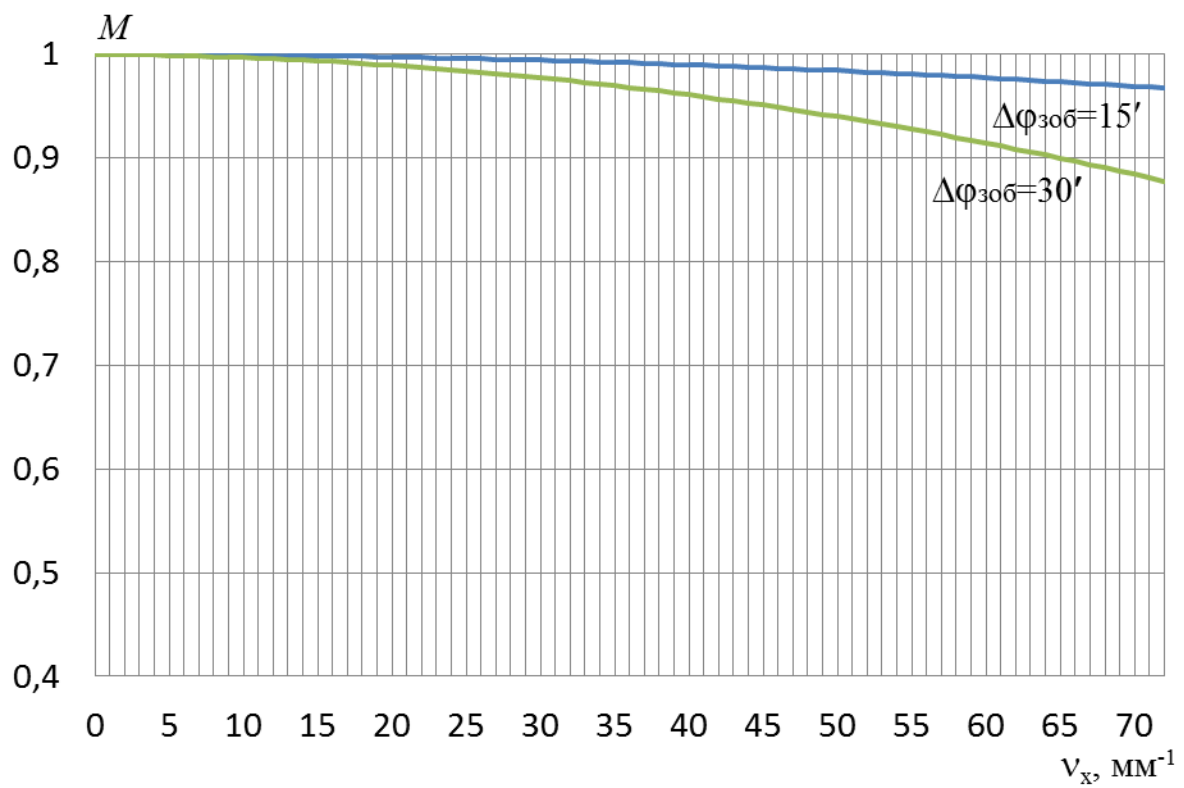


Рис. ДГ,8. МПФ за рахунок обертання Землі для СНВРЗ

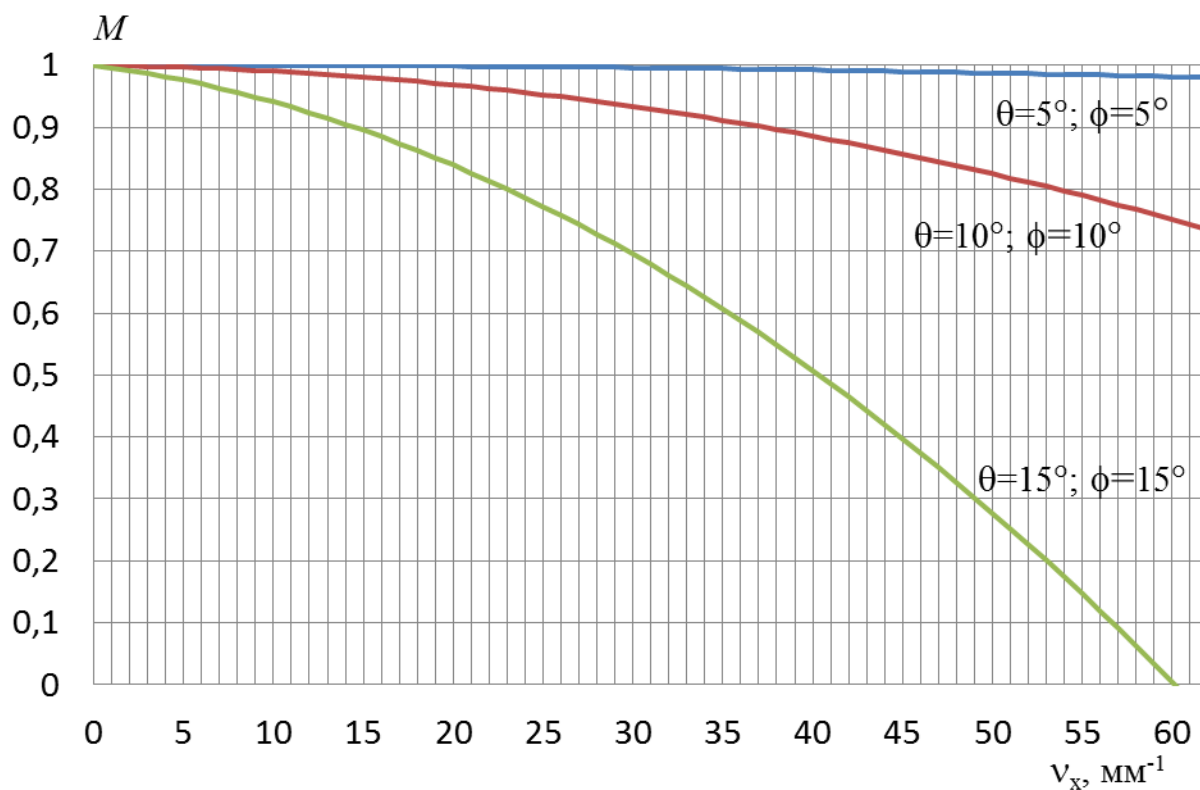


Рис. ДГ,9. МПФ при відхиленні осі від надиру для СВРЗ

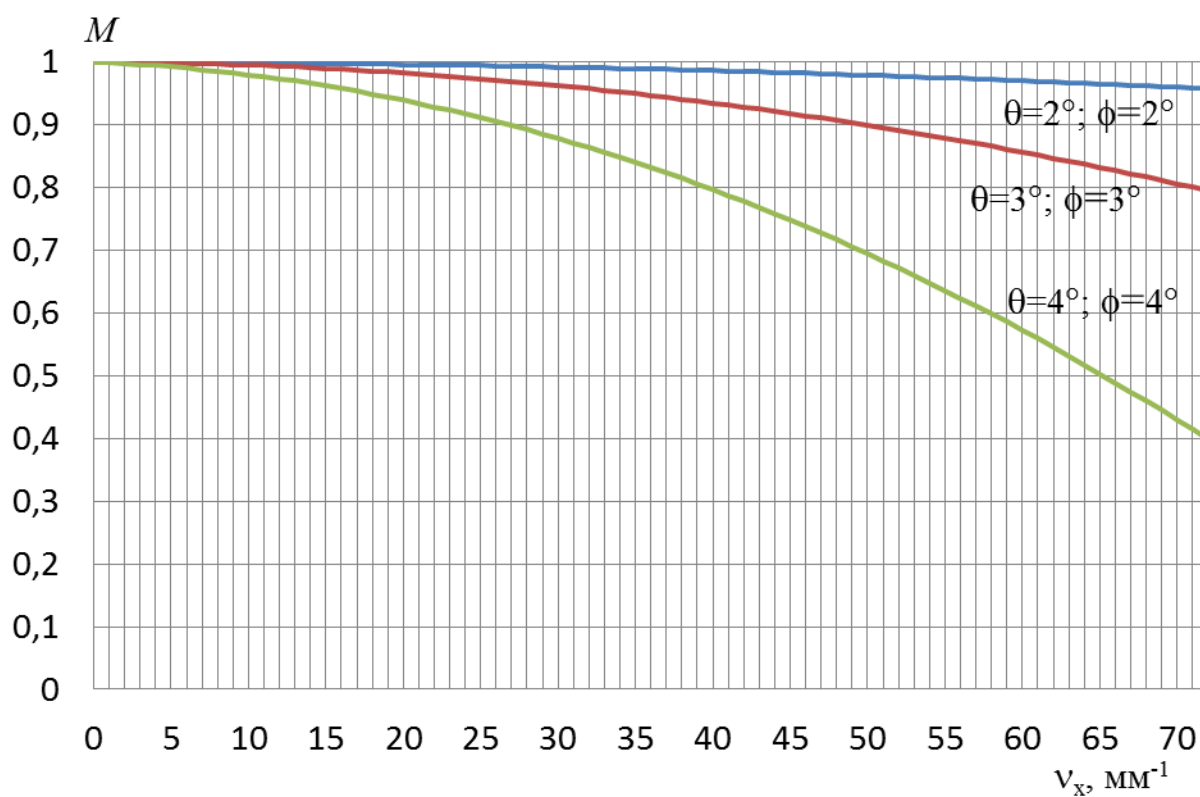


Рис. ДГ, 10. МПФ при відхиленні осі від надиру для СНВРЗ

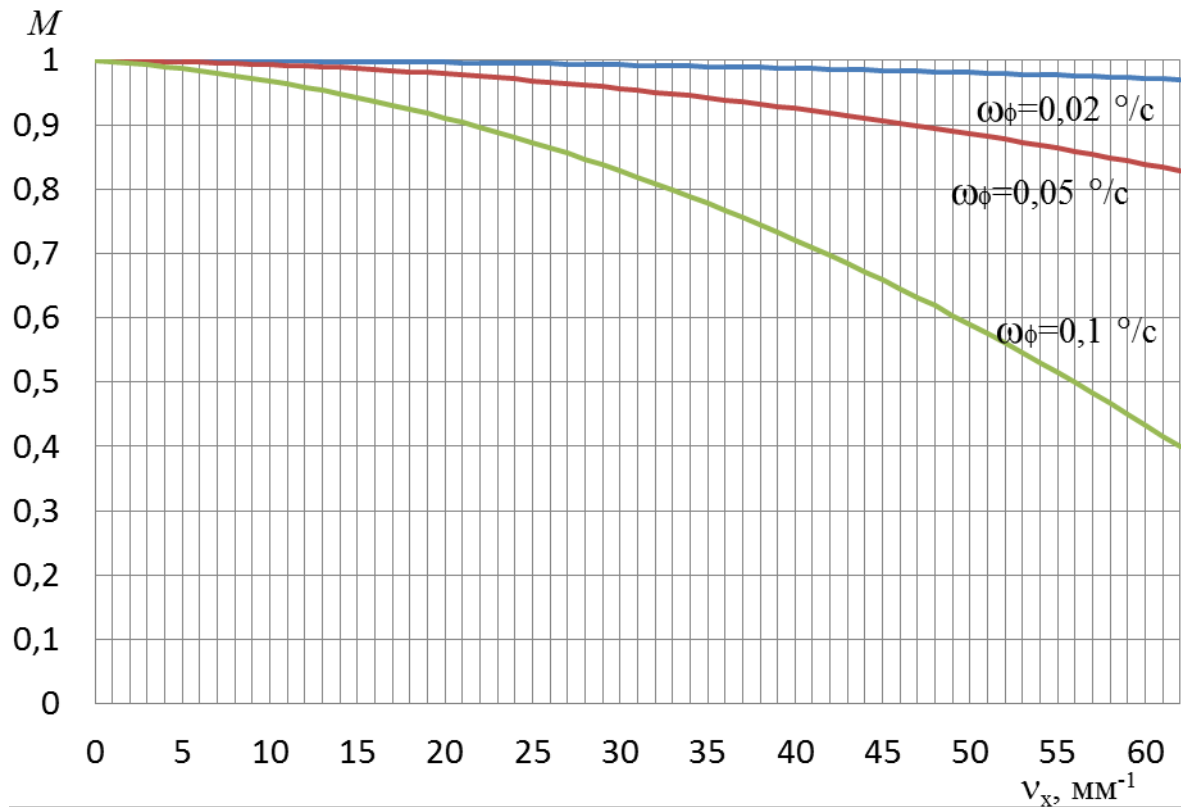


Рис. ДГ,11. МПФ при зйомці зі змінними кутами для СВРЗ

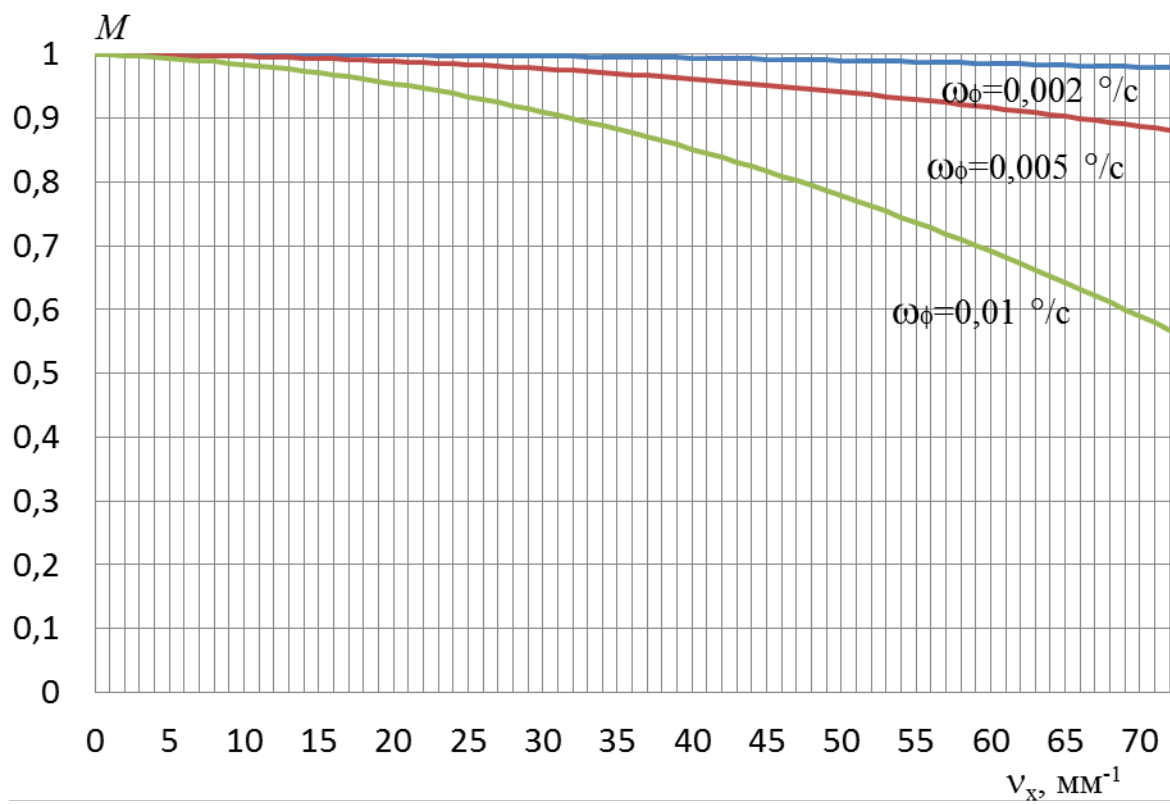


Рис. ДГ, 12. МПФ при зйомці зі змінними кутами для СНВРЗ

Додаток Д

Результати досліджень дзеркальних об'єктів

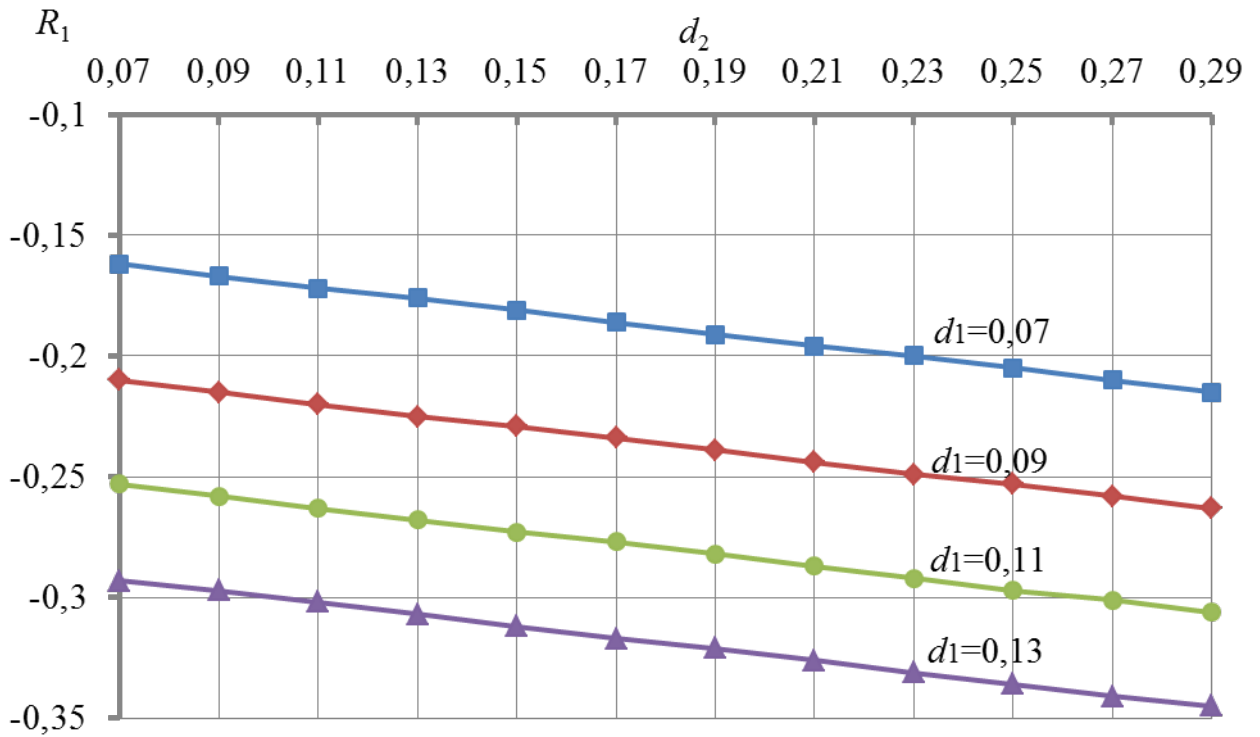


Рис. ДД,1. Нормований радіус головного дзеркала R_1 в залежності від відстані d_2 між дзеркалами

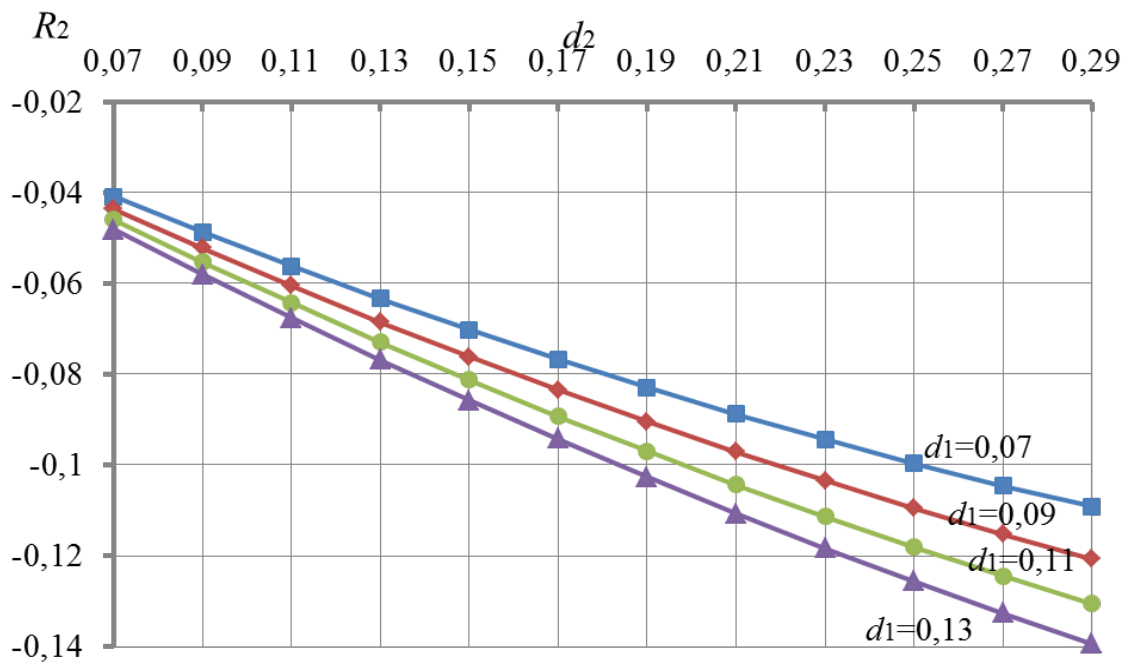


Рис. ДД,2. Нормований радіус вторинного дзеркала R_2 в залежності від відстані d_2 між дзеркалами

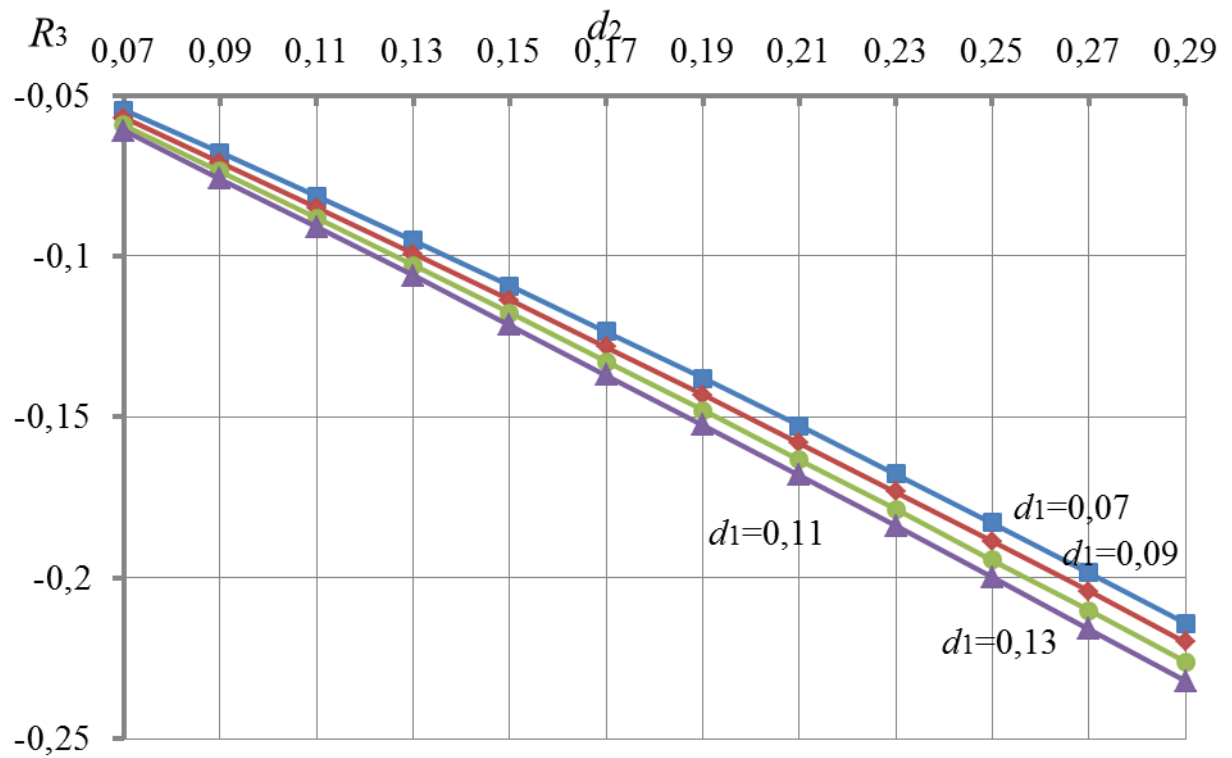


Рис. ДД,3. Нормований радіус третього дзеркала R_3 в залежності від відстані d_2 між дзеркалами

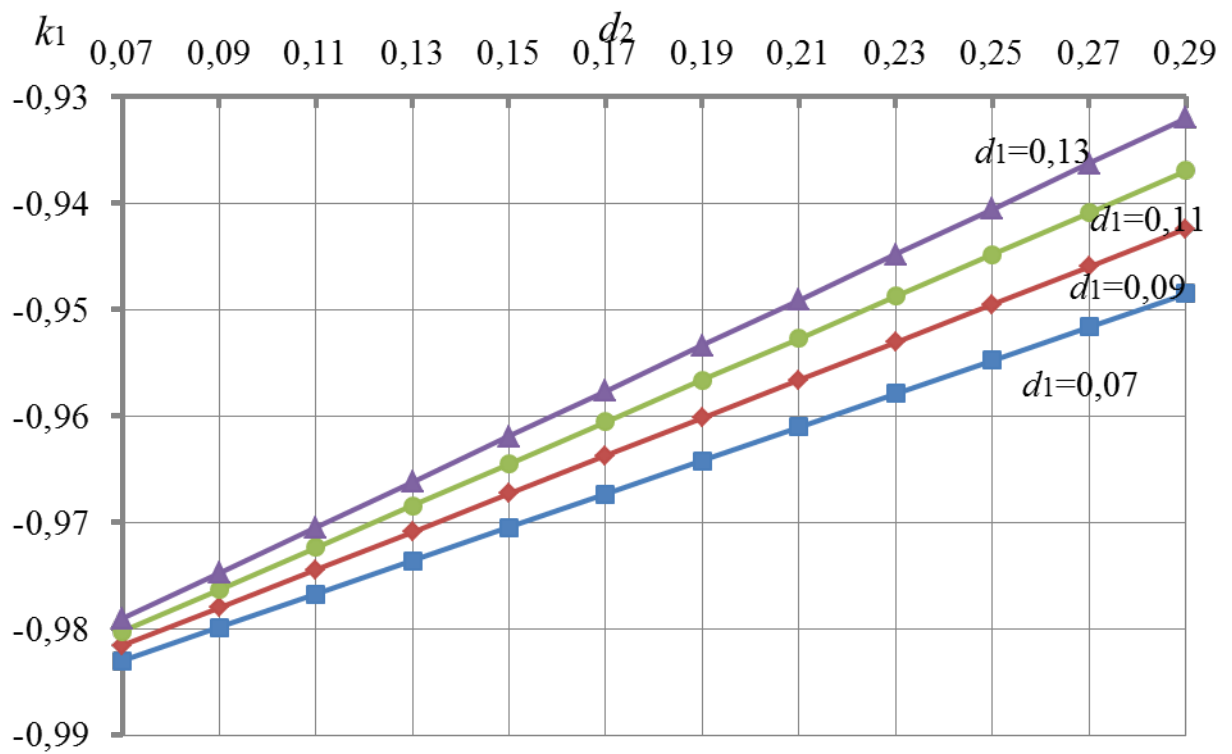


Рис. ДД,4. Конічна стала k_1 головного дзеркала в залежності від відстані d_2 між дзеркалами

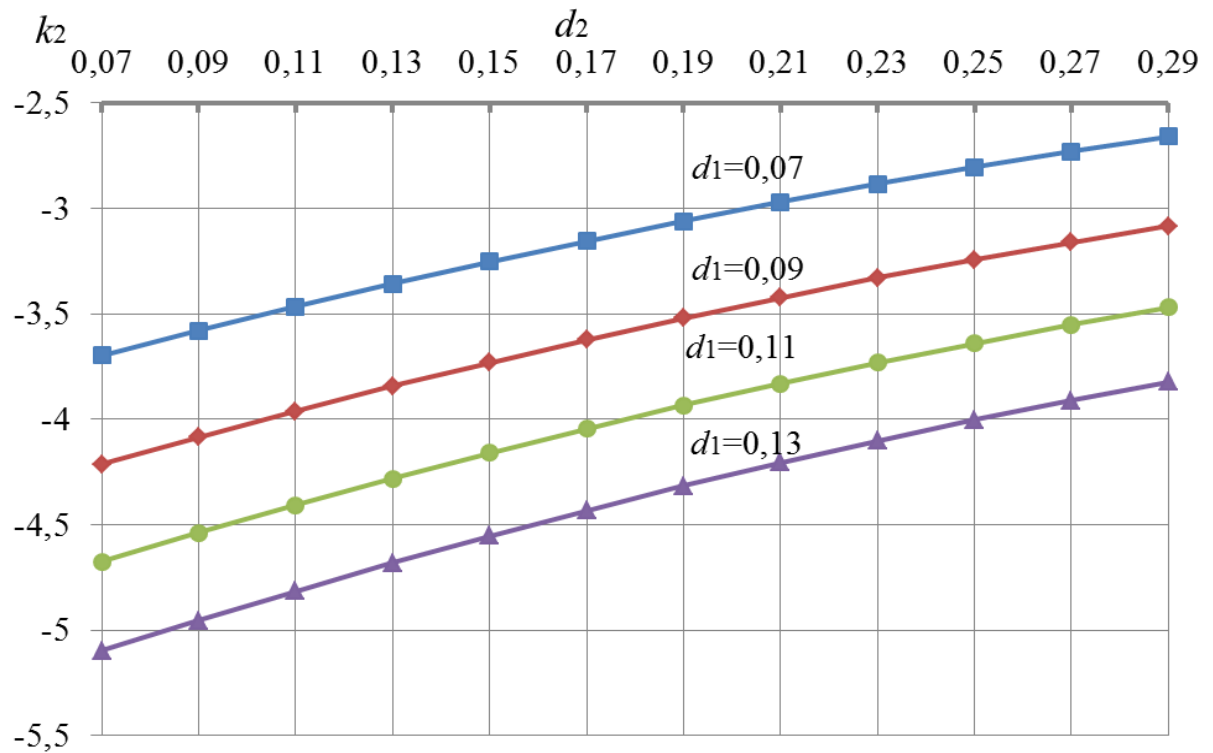


Рис. ДД,5. Конічна стала k_2 вторинного дзеркала в залежності від відстані d_2 між дзеркалами

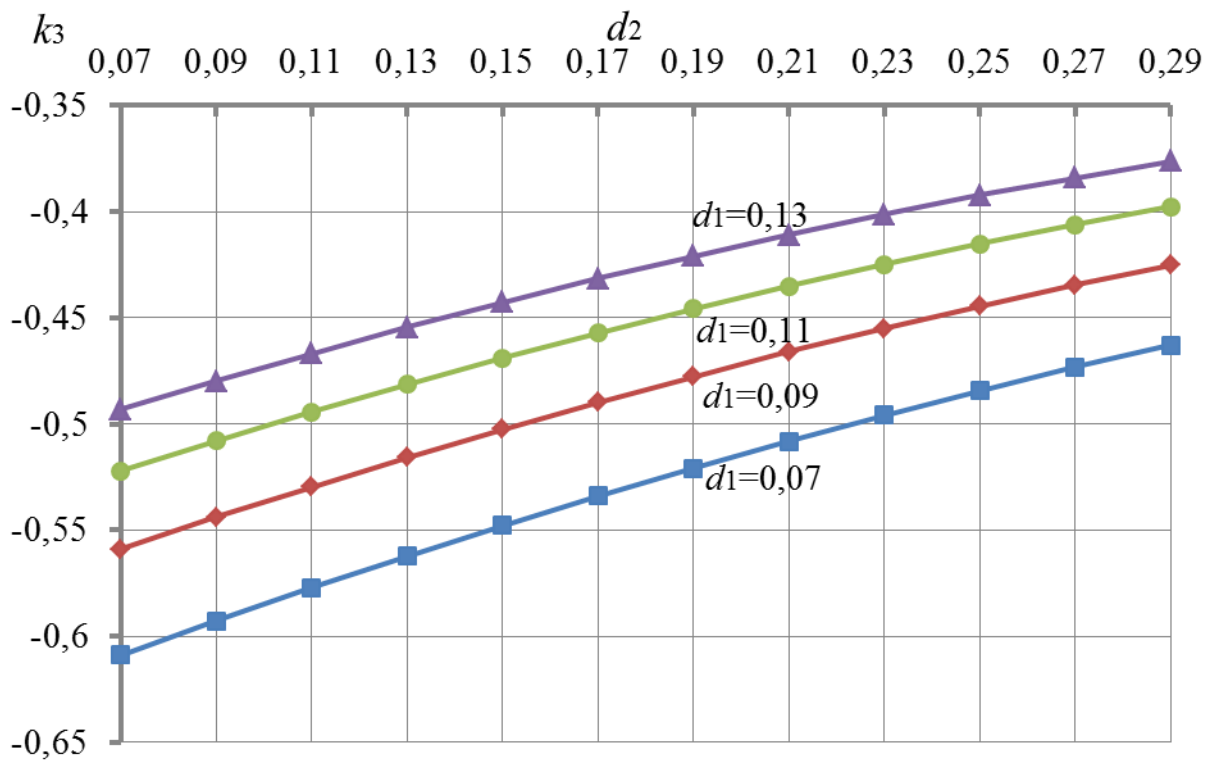


Рис. ДД,6. Конічна стала k_3 третього дзеркала в залежності від відстані d_2 між дзеркалами

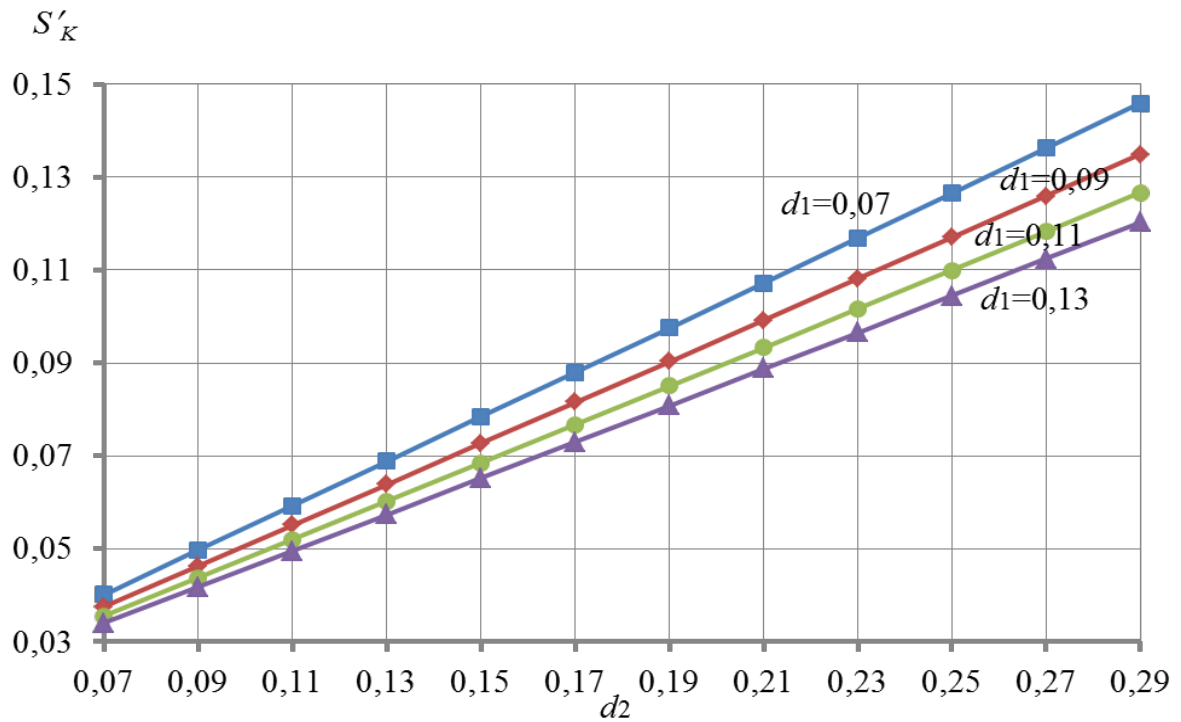


Рис. ДД,7. Відстань від вторинного дзеркала до площини проміжного зображення S'_K в залежності від відстані d_2 між дзеркалами

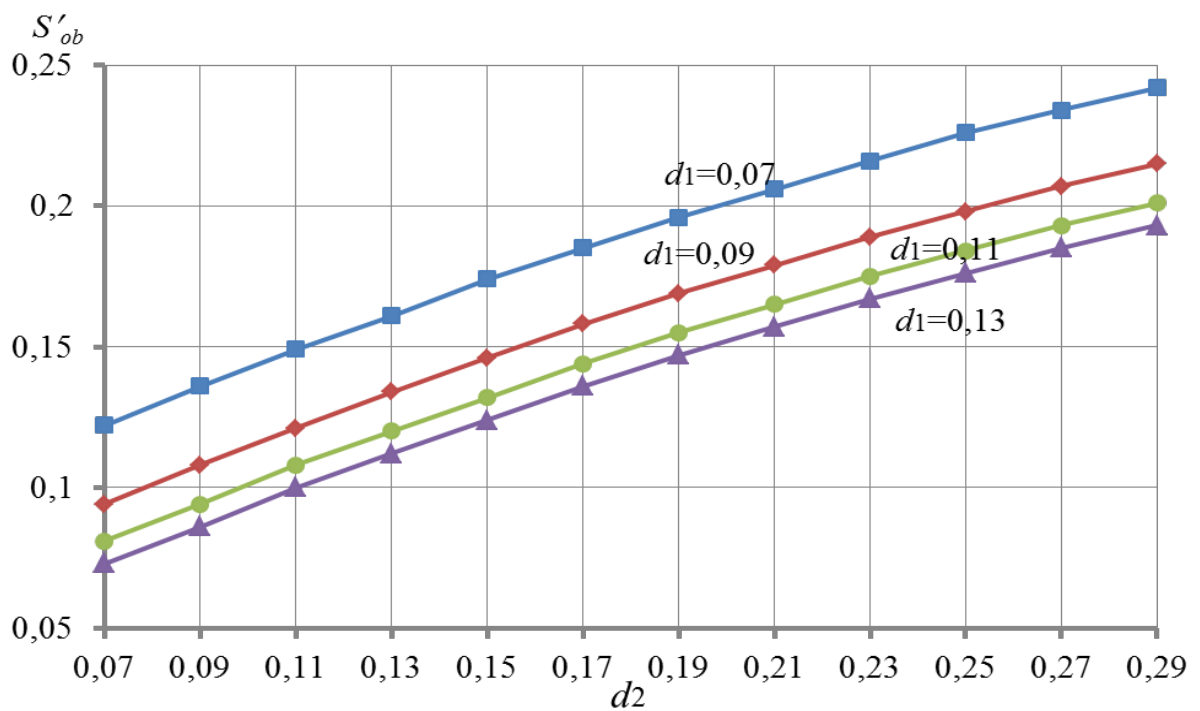


Рис. ДД,8. Відстань від плоского дзеркала S'_K до фокальної площини об'єктива в залежності від відстані d_2 між дзеркалами

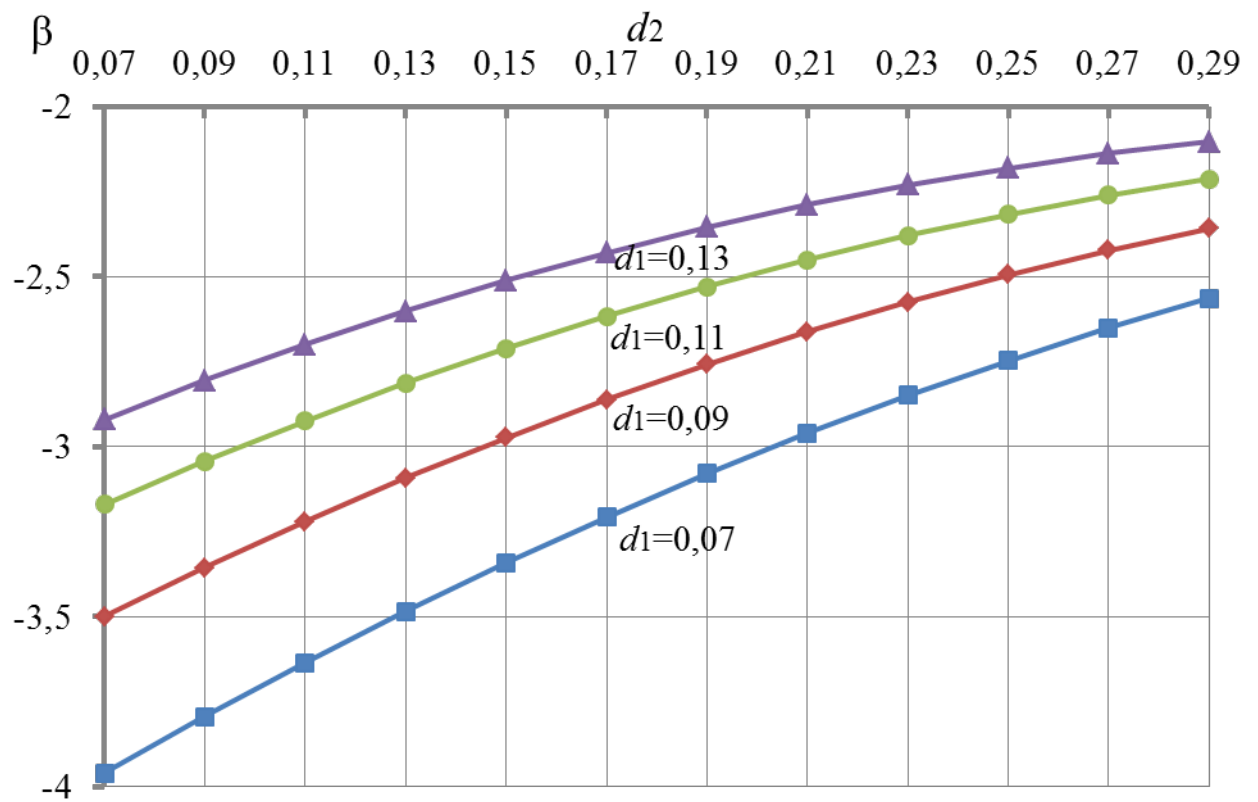


Рис. ДД,9. Збільшення β третього дзеркала в залежності від відстані d_2 між дзеркалами

ДОДАТОК Е

Таблиця ДЕ1

Дослідження матеріалу (а) - полірований алюміній

Номер спектрального діапазону та фільтр		$T_{фв}, ^\circ\text{C}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$T_{то}, ^\circ\text{C}$
(1)	без фільтра	30,00	30,05	30,06	29,87	23,62
(2)	8-13 мкм	30,00	30,04	30,07	29,87	23,68
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	30,00	30,05	30,08	29,88	23,93
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	30,00	30,05	30,07	29,88	23,66
(1)	без фільтра	28,00	28,02	28,06	27,90	23,85
(2)	8-13 мкм	28,00	28,03	28,07	27,91	23,93
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	28,00	28,04	28,06	27,92	23,82
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	28,00	28,04	28,06	27,89	23,87
(1)	без фільтра	26,00	26,01	26,04	25,97	23,67
(2)	8-13 мкм	26,00	26,01	26,04	25,94	23,65
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	26,00	26,00	26,04	25,94	23,70
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	26,00	26,00	26,04	25,95	23,67
(1)	без фільтра	24,00	23,99	24,00	24,01	22,91
(2)	8-13 мкм	24,00	24,00	24,01	24,01	22,90
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	24,00	24,00	24,00	24,00	22,93
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	24,00	24,00	24,02	23,97	22,93
(1)	без фільтра	22,00	21,98	21,99	22,03	22,68
(2)	8-13 мкм	22,00	21,99	21,99	22,03	22,69
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	22,00	21,99	22,00	22,00	22,45
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	22,00	21,98	21,99	22,03	22,72
(1)	без фільтра	20,00	19,98	20,00	20,04	22,15
(2)	8-13 мкм	20,00	19,98	20,00	20,02	22,17
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	20,00	19,98	19,99	20,03	22,23
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	20,00	19,98	20,00	20,05	22,16
(1)	без фільтра	18,00	17,96	17,99	18,05	21,70
(2)	8-13 мкм	18,00	17,96	17,99	18,06	21,69
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	18,00	17,96	18,00	18,04	21,64
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	18,00	17,96	17,99	18,06	21,70
(1)	без фільтра	16,87	16,83	16,88	16,94	21,37
(2)	8-13 мкм	16,87	16,82	16,86	16,92	21,39
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	16,87	16,83	16,86	16,92	21,34
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	16,88	16,83	16,87	16,94	21,37

Таблиця ДЕ2

Дослідження матеріалу (б) – латунь відшліфована

Номер спектрального діапазону та фільтр		$T_{фв}, ^\circ\text{C}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$T_{то}, ^\circ\text{C}$
(1)	без фільтра	30,00	30,05	30,08	29,89	23,40
(2)	8-13 мкм	30,00	30,04	30,08	29,87	23,40
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	30,00	30,06	30,08	29,88	23,38
(4)	8-13 мкм + CaF_2	30,00	30,04	30,06	29,89	23,27
(1)	без фільтра	28,00	28,03	28,06	27,92	23,12
(2)	8-13 мкм	28,00	28,02	28,04	27,89	23,11
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	28,00	28,05	28,06	27,90	23,11
(4)	8-13 мкм + CaF_2	28,00	28,02	28,06	27,91	23,07
(1)	без фільтра	26,00	26,01	26,03	25,96	22,72
(2)	8-13 мкм	26,00	26,01	26,03	25,96	22,72
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	26,00	26,02	26,03	25,97	22,72
(4)	8-13 мкм + CaF_2	26,00	26,02	26,03	25,96	22,65
(1)	без фільтра	24,00	24,00	24,01	23,99	22,39
(2)	8-13 мкм	24,00	24,00	24,02	23,99	22,39
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	24,00	24,01	24,02	23,98	22,41
(4)	8-13 мкм + CaF_2	24,00	24,00	24,00	23,99	22,41
(1)	без фільтра	22,00	21,99	22,00	22,00	22,16
(2)	8-13 мкм	22,00	22,00	22,00	22,00	22,17
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	22,00	22,01	22,01	22,01	22,16
(4)	8-13 мкм + CaF_2	22,00	21,99	22,00	22,00	22,15
(1)	без фільтра	20,00	19,99	20,01	20,01	21,82
(2)	8-13 мкм	20,00	19,99	20,01	20,02	21,79
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	20,00	19,98	20,00	20,00	21,82
(4)	8-13 мкм + CaF_2	20,00	20,00	20,03	20,00	21,82
(1)	без фільтра	18,00	17,97	18,01	18,00	21,38
(2)	8-13 мкм	18,00	17,98	18,02	18,01	21,40
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	18,00	17,99	18,04	18,02	21,40
(4)	8-13 мкм + CaF_2	18,00	17,98	18,00	18,00	21,40
(1)	без фільтра	16,24	16,19	16,23	16,27	20,78
(2)	8-13 мкм	16,23	16,20	16,23	16,28	20,78
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	16,22	16,20	16,24	16,26	20,80
(4)	8-13 мкм + CaF_2	16,22	16,18	16,23	16,25	20,83

Таблиця ДЕЗ

Дослідження матеріалу (в) – свинець необроблений

Номер спектрального діапазону та фільтр		$T_{фв}, ^\circ\text{C}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$T_{то}, ^\circ\text{C}$
(1)	без фільтра	30,00	30,21	30,24	29,57	23,08
(2)	8-13 мкм	30,00	30,19	30,22	29,53	23,52
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	30,00	30,21	30,23	29,57	23,56
(4)	8-13 мкм + CaF_2	30,00	30,21	30,25	29,55	23,6
(1)	без фільтра	28,00	28,13	28,17	27,70	23,34
(2)	8-13 мкм	28,00	28,14	28,18	27,68	23,35
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	28,00	28,13	28,17	27,69	23,38
(4)	8-13 мкм + CaF_2	28,00	28,14	28,19	27,70	23,46
(1)	без фільтра	26,00	26,07	26,11	25,82	23,16
(2)	8-13 мкм	26,00	26,07	26,11	25,82	23,14
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	26,00	26,08	26,10	25,79	23,05
(4)	8-13 мкм + CaF_2	26,00	26,09	26,10	25,81	23,00
(1)	без фільтра	24,00	24,02	24,04	23,92	22,62
(2)	8-13 мкм	24,00	24,02	24,05	23,92	22,63
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	24,00	24,02	24,05	23,93	22,69
(4)	8-13 мкм + CaF_2	24,00	24,03	24,05	23,91	22,75
(1)	без фільтра	22,00	22,01	22,01	21,97	20,95
(2)	8-13 мкм	22,00	22,00	22,01	21,99	20,98
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	22,00	22,01	22,01	21,98	21,18
(4)	8-13 мкм + CaF_2	22,00	22,00	22,01	21,99	21,35
(1)	без фільтра	20,00	19,97	19,98	20,07	21,04
(2)	8-13 мкм	20,00	19,97	19,99	20,08	21,05
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	20,00	19,97	19,98	20,05	21,04
(4)	8-13 мкм + CaF_2	20,00	19,97	19,99	20,06	21,04
(1)	без фільтра	18,00	17,93	17,96	18,14	20,72
(2)	8-13 мкм	18,00	17,93	17,96	18,14	20,73
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	18,00	17,93	17,96	18,13	20,81
(4)	8-13 мкм + CaF_2	18,00	17,91	17,95	18,14	20,72
(1)	без фільтра	16,00	15,88	15,93	16,24	20,29
(2)	8-13 мкм	16,00	15,88	15,92	16,24	20,29
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	16,00	15,87	15,93	16,21	20,21
(4)	8-13 мкм + CaF_2	16,00	15,87	15,93	16,22	20,30

Таблиця ДЕ4

Дослідження матеріалу (г) – латунь окиснена

Номер спектрального діапазону та фільтр	$T_{фв}, ^\circ C$	$T_1, ^\circ C$	$T_2, ^\circ C$	$T_3, ^\circ C$	$T_{то}, ^\circ C$
(1) без фільтра	30,00	30,01	30,05	29,95	24,84
(2) 8-13 мкм	30,00	30,03	30,06	29,87	24,98
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	30,00	30,05	30,09	29,90	25,01
(4) 8-13 мкм + CaF ₂	30,00	30,03	30,06	29,93	25,08
(1) без фільтра	28,00	27,98	28,01	28,01	25,13
(2) 8-13 мкм	28,00	27,98	28,01	27,99	25,14
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	28,00	27,99	28,00	27,99	25,14
(4) 8-13 мкм + CaF ₂	28,00	27,98	28,01	27,98	25,13
(1) без фільтра	26,00	25,99	26,00	25,99	24,98
(2) 8-13 мкм	26,00	26,00	26,00	26,00	24,98
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	26,00	26,00	26,00	26,00	24,98
(4) 8-13 мкм + CaF ₂	26,00	26,00	26,01	26,00	24,97
(1) без фільтра	24,00	23,98	23,99	24,00	24,54
(2) 8-13 мкм	24,00	23,98	24,01	24,00	24,55
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	24,00	24,02	24,00	24,00	24,57
(4) 8-13 мкм + CaF ₂	24,00	23,97	23,99	24,02	24,58
(1) без фільтра	22,00	21,99	22,01	21,99	24,06
(2) 8-13 мкм	22,00	21,99	22,02	22,01	24,06
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	22,00	21,99	22,00	22,01	24,04
(4) 8-13 мкм + CaF ₂	22,00	22,00	22,01	22,01	24,04
(1) без фільтра	20,00	19,98	20,02	20,00	23,42
(2) 8-13 мкм	20,00	19,98	20,02	20,00	23,43
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	20,00	20,00	20,02	20,00	23,45
(4) 8-13 мкм + CaF ₂	20,00	19,99	20,03	20,00	23,45
(1) без фільтра	18,69	18,68	18,70	18,68	22,82
(2) 8-13 мкм	18,51	18,53	18,52	18,53	22,66
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	18,55	18,57	18,56	18,57	22,82
(4) 8-13 мкм + CaF ₂	18,50	18,51	18,51	18,51	22,77

Таблиця ДЕ5

Дослідження матеріалу (д) – цегла вогнетривка

Номер спектрального діапазону та фільтр	$T_{фв}, ^\circ C$	$T_1, ^\circ C$	$T_2, ^\circ C$	$T_3, ^\circ C$	$T_{то}, ^\circ C$
(1) без фільтра	37,21	35,06	32,06	36,65	25,13
(1) без фільтра	34,58	37,16	37,16	29,46	25,16
(1) без фільтра	34,16	37,18	37,23	28,05	25,08
(2) 8-13 мкм	34,00	37,23	37,28	27,48	25,02
(4) 8-13 мкм + CaF ₂	34,02	37,25	37,30	27,43	24,97
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	33,92	37,28	37,35	27,13	25,00
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	33,00	35,81	35,84	27,37	24,76
(3) 8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	32,00	34,34	34,37	27,30	24,65

Дослідження матеріалу (е) – листове скло

Номер спектрального діапазону та фільтр		$T_{фв}, ^\circ\text{C}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$T_{то}, ^\circ\text{C}$
1)	без фільтра	30,00	30,61	30,71	28,67	21,84
2)	8-13 мкм	30,00	30,63	30,73	28,64	21,79
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	30,00	30,59	30,71	28,69	21,92
(4)	8-13 мкм + CaF_2	30,00	30,61	30,72	28,67	21,83
1)	без фільтра	28,00	28,46	28,53	26,98	21,53
2)	8-13 мкм	28,00	28,48	28,55	26,97	21,59
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	28,00	28,50	28,57	26,94	21,55
(4)	8-13 мкм + CaF_2	28,00	28,45	28,52	27,00	21,54
1)	без фільтра	26,00	26,32	26,37	25,28	21,37
2)	8-13 мкм	26,00	26,32	26,37	25,27	21,34
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	26,00	26,31	26,38	25,30	21,42
(4)	8-13 мкм + CaF_2	26,00	26,32	26,38	25,29	21,36
1)	без фільтра	24,00	24,20	24,22	23,58	21,13
2)	8-13 мкм	24,00	24,18	24,21	23,57	21,20
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	24,00	24,19	24,23	23,57	21,15
(4)	8-13 мкм + CaF_2	24,00	24,18	24,22	23,55	21,16
1)	без фільтра	22,00	22,08	22,09	21,81	20,72
2)	8-13 мкм	22,00	22,08	22,09	21,82	20,71
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	22,00	22,07	22,09	21,83	20,70
(4)	8-13 мкм + CaF_2	22,00	22,08	22,10	21,81	20,73
1)	без фільтра	20,00	20,01	20,03	19,94	20,01
2)	8-13 мкм	20,00	20,01	20,03	19,93	20,10
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	20,00	20,00	20,02	19,97	20,20
(4)	8-13 мкм + CaF_2	20,00	20,01	20,03	19,95	20,05
1)	без фільтра	18,00	17,94	17,95	18,08	19,37
2)	8-13 мкм	18,00	17,94	17,96	18,11	19,31
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	18,00	17,94	17,95	18,11	19,31
(4)	8-13 мкм + CaF_2	18,00	17,94	17,95	18,10	19,35
1)	без фільтра	16,00	15,75	15,79	16,49	19,16
2)	8-13 мкм	16,00	15,76	15,79	16,46	19,20
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	16,00	15,77	15,80	16,42	19,11
(4)	8-13 мкм + CaF_2	16,00	15,75	15,79	16,53	19,15

Таблиця ДЕ7

Дослідження матеріалу (ж) – папір

Номер спектрального діапазону та фільтр		$T_{фв}, ^\circ\text{C}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$T_{то}, ^\circ\text{C}$
1)	без фільтра	30,00	30,70	30,68	28,62	20,13
2)	8-13 мкм	30,00	30,74	30,71	28,58	20,29
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	30,00	30,76	30,80	28,44	20,31
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	30,00	30,75	30,79	28,46	20,41
1)	без фільтра	28,00	28,55	28,60	26,81	20,32
2)	8-13 мкм	28,00	28,57	28,61	26,83	20,33
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	28,00	28,57	28,59	26,82	20,36
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	28,00	28,55	28,59	26,84	20,34
1)	без фільтра	26,00	26,45	26,47	25,05	20,09
2)	8-13 мкм	26,00	26,41	26,43	25,14	20,10
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	26,00	26,42	26,43	25,16	20,11
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	26,00	26,43	26,46	25,07	20,11
1)	без фільтра	24,00	24,29	24,30	23,40	19,81
2)	8-13 мкм	24,00	24,29	24,32	23,39	19,76
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	24,00	24,29	24,31	23,39	19,79
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	24,00	24,29	24,31	23,37	19,80
1)	без фільтра	22,00	22,19	22,20	21,59	19,50
2)	8-13 мкм	22,00	22,17	22,18	21,65	19,53
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	22,00	22,17	22,18	21,65	19,67
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	22,00	22,17	22,18	21,61	19,51
1)	без фільтра	20,00	20,05	20,07	19,87	19,18
2)	8-13 мкм	20,00	20,06	20,08	19,83	19,11
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	20,00	20,05	20,07	19,85	19,12
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	20,00	20,07	20,07	19,84	19,13
1)	без фільтра	18,00	17,95	17,97	18,08	18,78
2)	8-13 мкм	18,00	17,95	17,96	18,08	18,80
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	18,00	17,95	17,96	18,05	18,78
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	18,00	17,95	17,97	18,09	17,75
1)	без фільтра	16,00	15,82	15,85	16,34	18,31
2)	8-13 мкм	16,00	15,82	15,87	16,33	18,32
(3)	8-13 мкм + 11,5-12,5 мкм	16,00	15,81	15,83	16,34	18,34
(4)	8-13 мкм + CaF ₂	16,00	15,84	15,87	16,27	18,34

Додаток Ж
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор-Головний конструктор
 КП СПБ «Арсенал»
 Тихоліт М.
 " " 2019 р.



Акт впровадження

Ми, що підписалися нижче, представники КП СПБ «Арсенал» начальник науково-технологічного комплексу Ріділа О.С., начальник відділу Оршак О.М., заступник начальника відділу Ворох А.М. склали цей акт про те, що розроблені в дисертаційній роботі заступника начальника науково-технологічного комплексу-головного конструктора напрямку КП СПБ «Арсенал» Тягура Володимир Михайловича «Підвищення просторового і енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі» методи розрахунку трьохдзеркального квазіортоскопічного об'єктиву з позаосьовим збільшенням полем зору та трьохдзеркального віссесиметричного об'єктиву з виправленою дисторсією, метод космічної зйомки для отримання субпіксельно зміщених зображень, математична модель формування зображення та формули спрощеного розрахунку величини проекції пікселя на поверхні Землі з урахуванням кутів відхилення візирної осі від надиру та кутів поля зору пікселя, метод розрахунку атермального трилінзового об'єктиву для ІЧ області спектру, метод геометричного калібрування кутових параметрів ОЕС ДЗЗ, метод вимірювання коефіцієнтів розсіювання об'єктів, метод та алгоритм моделювання впливу сили тяжіння, температури та кріплення дзеркал на їх деформацію при проектуванні полегшених дзеркал використані при проектуванні та створенні сканерів високої роздільної здатності (СВРЗ), надвисокої роздільної здатності (СНВРЗ), дальнього інфрачервоного діапазону (СДІЧ) та стендів геометричної і радіометричної калібровки сканерів.

 Тягур В.М.  Ріділа О.С.
 Оршак О.М.
 Ворох А.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Наукового центра
аерокосмічних досліджень Землі
ІГН НАН України
член-кореспондент НАН України

М.О. Попов

“22” 2019 р.



Акт впровадження № 10/2019

Ми, що підписалися нижче, представники Наукового центра аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України: голова комісії – заступник директора центру з наукової роботи О.В. Седлєрова, члени комісії – головний науковий співробітник доктор технічних наук С.А. Станкевич, головний науковий співробітник доктор технічних наук В.Г. Якимчук склали цей про те склали цей акт про те, що розроблений в дисертаційній роботі заступника начальника науково-технологічного комплексу-головного конструктора напрямку КП СПБ “Арсенал” Тягура Володимира Михайловича “Підвищення просторового і енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі” метод космічної зйомки для отримання субпіксельно зміщених зображень використано при розробленні алгоритмів та спеціалізованого програмного забезпечення для сканера дальнього інфрачервоного діапазону (СДІЧ) перспективної супутникової системи “Січ” в ході виконання складової частини дослідно-конструкторської роботи (СЧ ДКР) “Розроблення алгоритмів і відповідного програмного забезпечення субпіксельної обробки кадрів підстилаючої поверхні Землі, що формується СДІЧ” за контрактом №12/2016-АМ від 12.12.2016 р., номер держреєстрації 0116U008458.

Голова комісії

к. геол. н., с. н. с.  О.В. Седлєрова

Члени комісії

д. т. н., проф.  С.А. Станкевич

д. т. н., с. н. с.  В.Г. Якимчук

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор НДКІ «ЕЛВІТ»

Національного університету

«Львівська політехніка»

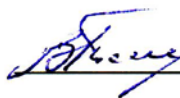
Ткаченко В.Ф.

2019 р.




Акт впровадження

Ми, що підписалися нижче, представники НДКІ «ЕЛВІТ» Національного університету «Львівська політехніка» старші наукові співробітники Тимошин С.В., Конопкін А.П., Холоша О.І. склали цей акт про те, що розроблена в дисертаційній роботі заступника начальника науково-технологічного комплексу-головного конструктора напрямку КП СПБ «Арсенал» Тягура Володимира Михайловича «Підвищення просторового і енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі» математична модель формування зображення та формули спрощеного розрахунку величини проекції пікселя на поверхні Землі з урахуванням кутів відхилення візирної осі від надиру та кутів поля зору пікселя використані при проектуванні та створенні апаратури обробки сигналів АОС-СВРЗ для сканера високої роздільної здатності (СВРЗ), яка розроблялась в НДКІ «ЕЛВІТ» Національного університету «Львівська політехніка».


 Тягур В.М.


 Тимошин С.В.


 Конопкін А.П.


 Холоша О.І.

Додаток 3

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основні публікації

1. Тягур В.М. Підвищення просторової роздільної здатності космічних мікроболометричних камер : монографія / В.М. Тягур, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко. – Київ: «Вік прінт», 2018. – 223 с.
2. Тягур В.М. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / В.М. Тягур, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2012. – №5. – С.114–117. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).
3. Тягур В.М. Новий метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Український метрологічний журнал. – 2013. – Вип. 3. – С. 27–32. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, [Emerging Sources Citation Index](#) (ESCI), [Bielefeld Academic Search Engine](#) (BASE) та інших).
4. Тягур В.М. Мінімальна роздільна різниця температур тепловізора космічного базування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20. – №1. – С. 23–27. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).
5. Тягур В.М. Установка для вимірювання коефіцієнта розсіювання об'єктивів у відповідності з новим методом його визначення / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Український метрологічний журнал. – 2014. – Вип. 1. – С. 26–34. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, [Emerging Sources Citation Index](#) (ESCI), [Bielefeld Academic Search Engine](#) (BASE) та інших).
6. Тягур В.М. Математическое моделирование тепловизионного прибора наблюдения с микроболометрической матрицей / В.М. Тягур, К.В.

Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // «Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування» – 2014. – №48 (2). – С. 28–38. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РИНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

7. Тягур В.М. Оптичні системи зображуючих Фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Космічна наука і техніка. – 2014. – Т. 20. – №5. – С. 35–40. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).

8. Тягур В.М. Трехзеркальный анастигматический квазиортоскопический объектив с внеосевым полем зрения / В. М. Тягур, Н. И. Лихолит // Космічна наука і техніка. – 2015. – Т. 21. – №2. – С. 27–33. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).

9. Тягур В.М. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельної обробки зображень / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.О. Попов, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // Наука та інновації, 2015. – Т.11. – № 6. – С.16–28.

10. Тягур В.М. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2017. – №2. – С.89–96. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

11. Tiagur V.M. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System's Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles / V.M. Tiagur, V.H. Kolobrodov, M.I. Lykholit, V.I. Mykytenko, C.V. Dobrovolska // Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotechnika Radioaparotobuduvannia. – 2017. – Iss. 69. – P. 30–34.. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ та інших).

12. Тягур В.М. Оптико-електронні системи дистанційного зондування Землі надвисокої роздільної здатності / В.М. Тягур // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2017. – Вип. 53(1) – С.16–24. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РИНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

13. Tiagur V. Development of software for combining finite element and optical analyses / V. Tiagur, V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – №4/9 (88). – С.46–53. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Scopus та інших).

14. Тягур В.М. Тридзеркальний анастигматичний осесиметричний об'єктив з виправленою дисторсією / В.М. Тягур // Космічна наука і техніка. – 2017. – Т. 23. – №5. – С. 55–61.

15. Тягур В.М. Просторове розділення системи дистанційного зондування при зміні кута візування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2018. – №1. – С. 54–64. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

16. Тягур В.М. Вплив кутів візування та кривизни поверхні Землі на просторове розділення космічної оптико-електронної системи спостереження / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2018. – №5. – С.63–75. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

17. Тягур В.М. Модуляційна передавальна функція системи дистанційного зондування при відхиленні осі візування від надира / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2018. – №6. – С.51–65. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

18. Тягур В.М. Метод калибровки угловых параметров сканеров дистанционного зондирования Земли / В.М.Тягур, Т.Н. Генсницкая, Т.И.

Гураль // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2019. – №1. – С.44–51. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

19. Тягур В.М. Обоснование технического облика бортового оптико-электронного комплекса среднего пространственного разрешения перспективного спутника дистанционного зондирования Земли / Тягур В.М., Попов М.А., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Лихолит Н.И., Полежаев В.В. // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сборник научных статей, Т.7, №2, М., ООО ДоМира, 2010. С. 293-299.

20. TYAGUR Vladimir M. Satellite imagery resolution enhancement using subpixel frames acquisition / Sergey A. STANKEVICH, Sergey V. SHKLYAR, Vladimir M. TYAGUR // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2013. – Vol 11. – No. 2 – P.135–145. (Закордонне видання індексується в наукометричних базах EBSCOhost, Compendex, Scopus, Inspec, ProQuest, Science Citation Index Expanded, and the Web of Science).

21. Тягур В.М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового апохромата / В.М. Тягур, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81. – №4. – С.42–47. (Закордонне видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Scopus та інших).

22. Tyagur V.M. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution / Tyagur V.M., Lyalko, Popov V.A., Stankevich S.A., Shklayr S.V., Podorva N.V., Likholt N.I., C.V. Dobrovolska C.V. // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2014. – Vol. 12. – No. 2 – P.153–164. (Закордонне видання індексується в наукометричних базах EBSCOhost, Compendex, Scopus, Inspec, ProQuest, Science Citation Index Expanded, and the Web of Science).

Патенти

23. Патент України на винахід №94157 Україна, МКВ G02B 23/02. Спосіб створення електронного зображення Землі у космічному сканері і пристрій для його реалізації / Тягур В.М., Гринюк І.Є., Лихоліт М.І., Пасько І.М., (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №94157; заявл. 25.09.2009 а200909785; опубл. 11.04.2011, Бюл. №7.

24. Патент України на винахід №94303 МКВ G02B 17/00 Три дзеркальний анастигматичний квазіортоскопічний об'єктив / Тягур В.М., Лихоліт М.І., Гринюк І.Є. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №94303; заявл. 08.07.2009 а200907107; опубл. 26.04.2011, Бюл. №8.

25. Патент України на винахід №96354 МКВ G06K 9/64 Пристрій для підвищення просторової розрізненості багатоспектральних аерокосмічних зображень на основі класифікування спектральних сігнатур об'єктів / Тягур В.М., Попов М.О., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Ліхоліт М.И., Полежаєв В.В. (Україна); заявник НЦАКДЗ ІГН. - №96354; заявл. 01.03.2010 а201002315; опубл. 25.10.2011, Бюл. №20.

26. Патент України на винахід №99217 МКВ G01J 3/12. Призмовий спектрометр / Тягур В.М., Кислий В.П., Леваш Л.В., Ліптуга А.І., Прохорович А.В. (Україна); заявник Інститут фізики напівпровідників. - №99217; заявл. 24.05.2011 а201106550; опубл. 25.07.2012, Бюл. №14.

27. Патент України на винахід №103242 МКВ G01M 11/02, G02B 13/00. Пристрій для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів та виробів на їх основі і спосіб його використання / Тягур В.М., Камінський С.Ф., Лихоліт М.І. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №10342; заявл. 08.12.2011 а201114581; опубл. 25.09.2013, Бюл. №18.

28. Патент України на винахід №108282 МКВ G02B 9/14; G02B 13/14 . Трилінзовий атермальний світлосильний об'єктив для інфрачервоного діапазону спектра / Тягур В.М., Лихоліт М.І., Варьонова Г.Л. (Україна);

заявник КП СПБ «Арсенал». - №108282; заявл. 04.07.2013 а201308394; опубл. 10.04.2015, Бюл. №7.

29. Патент України на винахід №109181 МКВ G01C 3/08 Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення/ Тягур В.М., Лихоліт М.И., Лялько В.І., Попов М.О., Станкевич С.А., Харитоненко К.В. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №109181; заявл. 17.09.2013 а201311086; опубл. 27.07.2015, Бюл. №14.

30. Патент України на винахід №113104 МКВ G02B 17/00; G02B 17/06. Тридзеркальний анастигматичний бездисторсійний об'єктив / Тягур В.М., Лихоліт М.И. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №113104; заявл. 22.04.2015 а201503823; опубл. 12.12.2016, Бюл. №23.

31. Патент України на винахід №117909 МКВ G01C 3/08 Інфрачервоний матричний знімальний спектро радіометр субпіксельної розрізненості / Тягур В.М., Попов М.О., Станкевич С.А., Лялько В.І., Лихоліт М.И., Добровольська К.В. (Україна); заявник НЦАКДЗ ІГН. - №117909; заявл. 04.11.2014 а201411946; опубл. 25.10.2018, Бюл. №20.

Матеріали конференцій

32. Тягур В.М. Досягнення і проблеми розвитку аерокосмічних оптико-електронних сенсорів ДЗЗ / В.М. Тягур, М.О. Попов, М.И. Лихоліт, В.В. Полежаєв С.А. Станкевич С.А. // Матеріали доповідей Першої Всеукраїнської конференції з запрошенням закордонних учасників. – Київ. – 2008. – С. 23–25.

33. Тягур В.М. Возможности спутниковых гиперспектрометров при решении тематических задач природопользования, экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций / М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.П. Ковальчук, Н.И. Лихолит, В.В. Полежаев // Збірник наукових праць 8 Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні

інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях”. – Крым. – 2009. – С. 50–65.

34. Тягур В.М. Программа расчета дифракционных компенсаторов для контроля асферических поверхностей / В.М. Тягур, А.П. Чумак // Збірник тез доповідей IX науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2010. – С.67–68.

35. Тягур В.М. Программа для расчета энергетических и пространственных характеристик сканера дистанционного зондирования Земли поверхностей / В.М. Тягур, А.П. Чумак, О.Ю. Сахарнова // Збірник тез доповідей IX науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2010. – С.68–69.

36. Тягур В.М. Оптическая система гиперспектрометра для дистанционного зондирования Земли / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей X науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2011: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2011. – С.51–52.

37. Тягур В.М. Оптические системы инфракрасных объективов для охранных систем наблюдения / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, А.Л. Варенова, И.В. Вовк, В.М. Кузнецов // Збірник тез доповідей X науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2011: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2011. – С. 52–53.

38. Tiagur V.M. Design of compact multiband satellite imager using complex mathematical model / A.L. Makarov, L.V. Varichenko, N.I. Lykholit, I.E. Hrynyuk, V.M. Tiagur, V.F. Tkachenko, R.V. Kurdydyk // Proc. SPIE 8011, 80111T. Abstracts book of 22nd General Congress of the International Commission for Optics (ICO-22). – Puebla: Mexico. – 2011. – P.151–152.

39. Тягур В.М. Оптические системы многоспектрального сканера и сканера среднего ИК-диапазона для дистанционного зондирования Земли / Тягур В.М., Рыбак В.В. // Международная научная конференция

«Независимый Казахстан: 20 лет развития космических исследований». – Алматы: Казахстан. – 2011. – С. 27.

40. Тягур В.М. Метод калибровки угловых параметров ОЭП / В.М.Тягур, Т.И. Гураль, Т.Н. Генсцкая, Н.И., П.В. Соболев // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 52–53.

41. Тягур В.М. Субпіксельна обробка інфрачервоних космічних зображень з метою підвищення їх роздільної здатності / В.М.Тягур, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, К.В. Харитоненко // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 53–54.

42. Тягур В.М. Новий метод визначення коефіцієнту розсіювання об’єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт М.І. // Збірник тез доповідей XI наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 55–56.

43. Тягур В.М. Установка для визначення, у відповідності з новим методом, коефіцієнту розсіювання об’єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Збірник тез доповідей XI наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 56–57.

44. Тягур В.М. Удосконалення установки для визначення по новому методу коефіцієнту розсіювання об’єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 58–59.

45. Тягур В.М. Мікроболометрична матрична камера дальнього інфрачервоного діапазону для космічної зйомки / В.М. Тягур, М.О. Попов, М.І. Лихоліт, С.А. Станкевич, О.В. Тітаренко // Збірник тез доповідей XI

науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 68–69.

46. Тягур В.М. Атермальный объектив для ИК-сканера ДЗЗ, работающий в диапазоне температур -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$ / В.М. Тягур, Н.И. Лихолит, А.Л. Варенова, В.И. Парубец // Збірник тез доповідей XII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2013. – С. 61–62.

47. Тягур В.М. Апаратура для контролю тепловизионных приборов / В.М. Тягур, Т.И. Гураль, Т.Н. Генсичкая, Н.И. Овчар, В.П. Соболев // Збірник тез доповідей XII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2013. – С. 62–63.

Здобувачем розроблена структура стенду для вимірювання МРРТ.

48. Tyagur V. Subpixel Resolution Satellite Imaging Technique / V. Tyagur, S. Stankevich, S. Shklyar // Digital Technologies, Proceedings of the Ninth International Conference. – ZILINA, SLOVAKIA. – 2013. – P. 81–84.

49. Тягур В.М. ИК-камера космического базирования с микроболометрической матрицей / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «ABIA-2013». – Київ. – С. 27.41–27.44.

50. Тягур В.М. Методы компьютерного повышения разрешения инфракрасных изображений для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И.. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // Матеріали XI наук.-техн. конференції «ABIA-2013». – Київ. – С. 27.52–27.56.

51. Тягур В.М. Основные характеристики ИК камер для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И.. Лихолит, В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Е.В. Добровольская // Тези доповідей XIII наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – К.: НТТУ “КПІ”. – 2014. – С. 47.

52. Тягур В.М., Оптичні системи зображуючих Фур'є – спектрометрів дистанційного зондування Землі / Н.И.. Лихолит, В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков//Збірник тез доповідей XIII конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2014. – С. 64–65.

53. Tyagur V. Subpixel processing of images from the frame infrared camera for future Ukrainian remote sensing satellite system / V. Tyagur, S. Stankevich, M. Popov, V. Lyalko, S. Shklyar, C. Dobrovolska, N. Likholyt // Digital Technologies, Proceedings of the 10th International Conference. – 2014. – ZILINA, SLOVAKIA. – P. 232–235.

54. Tyagur V. Functional model of the new multiband infrared radiometer for “Sich” Earth observation satellite system / V. Tyagur, S. Stankevich, M. Popov, S. Shklyar, C. Dobrovolska // Тези доповідей на 14-й Українській конференції з космічних досліджень. – Ужгород. – 2014. – С.72.

55. Тягур В.М. Математична модель тепловізійної камери космічного базування з субпіксельною реєстрацією зображень / В. М. Тягур, К.В. Добровольська, М. І. Лихоліт, Колобродов В.Г. // Тези доповідей на 14-й Українській конференції з космічних досліджень.– Ужгород. – 2014.– С. 74.

56. Тягур В.М. Объективы систем ДЗЗ КП СПС «Арсенал» / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української наукової конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С. 28–32.

57. Тягур В.М. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра із субпіксельним підвищенням просторової розрізненності / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.І. Лихоліт, К.В. Добровольська та інші // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С. 33–35.

58. Тягур В. М. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень ІЧ камери ДЗЗ та експериментальні дослідження підвищення просторової

роздільної здатності / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.І. Лихоліт, К.В. Добровольська та інші // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.47–50.

59. Тягур В.М. Математична модель функціонування статичного зображуючого фур'є-спектрометра дистанційного зондування Землі / Д.В. Поздняков, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Збірник тез конфер. «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.53–55.

60. Тягур В.М. Исследование характеристик аппаратуры контроля тепловизионных систем с использованием аппаратуры контроля “IRVISION” / В.М. Тягур, Т.И. Гураль, Н.И. Овчар, Р.Б. Рысов, В.П. Соболев // Збірник тез доповідей Української наукової конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.122–125.

61. Тягур В.М. Метод та обладнання для визначення коефіцієнта розсіювання знімальних об'єктів та об'єктів для спостереження / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт / Збірник тез доповідей конфер. «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.126–130.

62. Тягур В.М. Исследование влияния параметров микроболометрических матриц на характеристики ИК камер космического базирования / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихоліт // Збірник тез доповідей XIV наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2015. – С. 69–70.

63. Тягур В.М. Математичне моделювання зображувального Фур'є-спектрометра статичного типу для дистанційного зондування Землі / В. М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XIV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2015. – С.71.

64. Tiagur V.M. Accuracy Improvement Of The Land Surface Physical Paramemers Estimation By Infrared Satellite Imaging / V. M. Tiagur, S.A. Stankevich, C. V. Dobrovolska, N.S. Lubsky N.S. // Збірник тез доповідей 15 Української конференції з космічних досліджень. – Одеса. – 2015. – С. 212.

65. Тягур В.М. Контроль форми ввігнутих асферичних дзеркал / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КП”. – 2016. – С. 35–36.

66. Тягур В.М. Моделирование полегшення дзеркал оптичної системи космічного базування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КП”. – 2016. – С. 36–37.

67. Тягур В.М. Модуляционная передаточная функция микроболометрической матрицы при использовании субпиксельной регистрации изображений / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 195.

68. Тягур В.М. Анализ влияния деформаций оптических поверхностей на качество изображения в сканерах ДЗЗ/В.М. Тягур, К.А. Нгуен, В.М. Сокурено // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 209.

69. Тягур В.М. Аналіз впливу полегшення дзеркал для сканерів ДЗЗ на деформацію їх оптичної поверхні / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 218.

70. Тягур В.М. Целостная технология получения изображений повышенного пространственного разрешения от перспективного спутникового инфракрасного спектрорадиометра / В.М. Тягур, Н.І. Лихоліт, В.І. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич, К.В. Добровольская // Тези

доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 225.

71. Тягур В.М. Оптико-электронные системы ДЗЗ сверхвысокой разрешающей способности / В.М. Тягур // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса – 2016. – С. 228.

72. Tiagur V.M. Three-mirror anastigmatic quasi-ortoscopic lens / V.M. Tiagur // Proceeding of 2016 China-Ukraine forum on Science and Technology. – 2016. – P. 132.

73. Тягур В.М. Оценивание параметров тепловизионных систем наблюдения на аппаратуре контроля «IR VISION» / Гураль Т.И., Тягур В.М., Лихолит Н.И., Овчар Н.И., Кирилюк Н.Е // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 63–65.

74. Тягур В.М. Мінімальна сприймаюча різниця температур тепловізора / В.М. Тягур, М.М. Луцюк, В.Г. Колобродов // Збірник тез доповідей 2-ої Української наукової конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 65–68.

75. Тягур В.М. Использование модели функции рассеяния точки объектива для повышения разрешения изображений ИК камер при дистанционном зондировании Земли / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, П.А. Кондратов, А.Г. Оганесян, В.Ф. Ткаченко // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 182–185.

76. Тягур В.М. Метод контролю форми асферичних дзеркал / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XVI наук.-техн. конф. «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи». – К.: ПФБ НТТУ «КПІ». – 2017. – С. 32–33.

77. Тягур В.М. Облегчение крупногабаритных зеркал и методы их крепления / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Сборник тезисов докладов 6-й

Международной конференции «Космические технологии: Настоящее и будущее». – Днепр. – 2017. – С. 80.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання кріплення дзеркал.

78. Tiagur Volodymyr M. Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles / Volodymyr M. Tiagur Valentin G. Kolobrodov; Catherine V. Dobrovolska; Volodymyr I. Mykytenko; Grygorij S. Tymchik // Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. – 2017. – 104450J.

79. Тягур В.М. Тенденції розвитку систем ДЗЗ / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 3-ої наук.-техн. конфер. «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С. 18–19.

80. Тягур В.М. Сканер сверхвысокой разрешающей способности / В.М. Тягур, А.С. Притула // Збірник тез доповідей 3-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С.112–113.

81. Тягур В.М. Повышение разрешения изображений ИК камер при дистанционном зондировании Земли / В.М. Тягур, П.А. Кондратов, Е.В. Добровольская, П.А. А.Г. Оганесян, В.Ф. Ткаченко // Збірник тез доповідей 3-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С. 131–134.

82. Тягур В.М. Оцінка ефективності тепловізійних та телевізійних космічних систем спостереження / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Збірник тез доповідей наук.-техн. конф. «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С. 134–137.

83. Тягур В.М. Оптимізація габаритно-вагових параметрів систем ДЗЗ надвисокої просторової роздільної здатності / В.М. Тягур // Збірник тез

доповідей XVII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – К.: ПФБ НТТУ “КП”. – 2018. – С. 37–38.